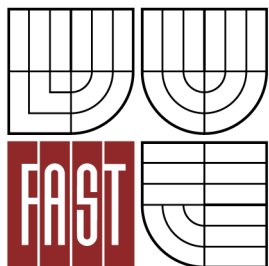




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND

VYUŽITÍ ZRYCHLENÝCH TESTŮ TRVANLIVOSTI LEPENÝCH SPOJŮ DŘEVA PRO PREDIKCI ŽIVOTNOSTI SPOJE

UTILIZATION OF ACCELERATED DURABILITY TEST OF WOOD GLUED JOINTS FOR
CONSEQUENT SERVICE-LIFE PREDICTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. DAVID ŠMÍRA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. David Šmíra
Název	Využití zrychlených testů trvanlivosti lepených spojů dřeva pro predikci životnosti spoje
Vedoucí diplomové práce	Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Handbook of Adhesion, Packham, D. E. (Ed.), 2nd Edition, 2005, John Wiley & Sons
Handbook of Adhesion Technology, Lucas F. M. da Silva, Andreas Öchsner, Robert D. Adams (Eds), 1st Edition., 2011, Springer, 1543 p.
López-Suevos, F., Frazier, Ch. E. Rheological and Fracturecleavage Analysis of the Effect of Phenolic Additives on the Durability of PVAc Latex Adhesives, In: Proc. of Wood Adhesives 2005 Conference, Madison, WI, pp. 127–129 (2005).
Chen, G.-F. Two-Part Polyurethane Adhesive for Structural Finger Joints, In: Proc. of Wood Adhesives 2000 Conference, Madison, WI, pp. 65–72 (2000).

Zásady pro vypracování

Životnost lepeného spoje u dřevěných prvků, resp. snížení pevnostních charakteristik spoje, je ovlivněna zejména příčinami, jako je únavové poškození (expozice cyklickému zatížení), vliv vnějších podmínek (teplota, vlhkost), vliv objemových změn dřevěného adherendu a kríčovými chováními lepidla při zvýšeném působení napětí, teploty a vlhkosti. Na základě mnoha experimentů byly sestaveny různé modely (mechanistický, mechanika únavové pevnosti, pevnostní model) s rozdílnou vypovídající schopností.

Diplomant v teoretické části popíše všechny doposud známe přístupy, kterými jsou popsány trvanlivostní aspekty lepených dřevěných spojů. V této části bude důraz věnován postupům, které zahrnují zejména hygrotermální působení na lepenou spáru za využití modelování pomocí Arrheniova vztahu.

V praktické části bude experiment zaměřen na vyhodnocení trvanlivosti lepených spojů, která bude zjištěna následujícím postupem:

- 1) příprava zkušebních těles za použití lepidel fenol-rezorcínformaldehydového, melamín-močovinoformaldehydového, polyuretanového, emulzní polyisokyanát a epoxidového lepidla.
- 2) Expozice cyklům (cyklický způsob dle EN 302-2) při různých teplotních a vlhkostních expozičních.
- 3) Provedení EPI-fluorescenční analýzy pro všechny druhy lepidel určující hloubku proniku lepidla do dřevěného adherendu.
- 4) Numerická analýza predikce chování lepené spáry na základě dosažených smykových parametrů s využitím teorie rychlosti kinetické reakce.

Předpokládaným výstupem diplomové práce bude na základě výsledků experimentu vyjádření predikce životnosti lepených prvků pro různé druhy lepidel.

Předepsané přílohy

.....
Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na přístupy, kterými lze popsat trvanlivostní aspekty lepených dřevěných spojů. Hlavní náplň práce je zaměřena na postupy, které zahrnují především hygrotermální namáhání působící na lepenou spáru u dřevěného adherendu a určení životnosti daného lepeného spoje za využití Arrheniova modelu a dalších modelů. Dále je práce směřována na smykové zkoušky pro exponování vzorků v různých teplotních a vlhkostních expozicích a pro jednotlivé sady expozic na určení hloubky proniku lepidla do dřevěného adherendu pomocí EPI fluorescenční analýzy. Tyto analytické metody využíváme k ověření dostatečné kvality lepeného spoje, které jsou většinou založeny na pevnostních, chemických či strukturních parametrech zkoušeného vzorku.

Klíčová slova

Lepené lamelové výrobky, zubovitý spoj, lepidlo, lepená spára, dřevěný adherend, koheze, kohezní porušení, lamelový prvek

Abstract

The aim of my diploma thesis are methods which are able to describe durability aspects of glued wooden joints. The main objective are methods which primarily includes hygrothermal stress acting in the glued joint of wooden adherend and determine the service life of the specific glued joint by modelling based on Arrhenius relation and the other methods. Other part of this work is aimed to shear tests of the samples exposed to different thermal and humidity conditions and for individual sets of exposures determining the glue penetration depth into the wooden adherend by EPI fluorescent analysis. These analytic methods are used for quality check of the glued joints, which are mostly based on strength, chemical or structural parameters of the tested sample.

Keywords

Glued laminated products, Finger joint, adhesive, bondline, wood adherend, cohesion, wood failure, laminated member

Bibliografická citace VŠKP

Bc. David Šmíra *Využití zrychlených testů trvanlivosti lepených spojů dřeva pro predikci životnosti spoje*. Brno, 2013. 73 s., 10 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jan Vaněrek, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17.12.2013

.....
podpis autora
Bc. David Šmíra

PODĚKOVÁNÍ:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za jeho rady a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky. V neposlední řadě také děkuji všem respondentům za věnovaný čas a poskytnutí potřebných informací nebo rad.

Obsah

1.	Úvod	11
2.	Lepené spoje – požadavky na zkoušení.....	12
2.1.	Lepené lamelové dřevo	12
2.1.1.	Třídění konstrukčního dřeva pro lepené lamelové výrobky Chyba! Záložka není definována.	
2.1.2.	Výroba lepeného lamelového dřeva	15
2.1.3.	Požadavky na prkna.....	16
2.1.4.	Požadavky, užité vlastnosti a výrobní požadavky:.....	17
2.2.	Lepidla	19
2.2.1.	Klasifikace lepidel	20
2.2.2.	Hlavní typy porušení lepeného spoje	21
2.2.3.	Výběr laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů.....	23
2.2.4.	Vybrané současné druhy lepidel pro nosné dřevěné konstrukce.....	24
2.2.5.	Nová potencionální lepidla pro nosné dřevěné prvky	26
3.	Trvanlivost lepených dřevěných spojů.....	27
3.1.	Zkoušení lepeného lamelového dřeva.....	28
3.1.1.	EN 14080 - Lepené lamelové dřevo – Zkouška delaminace lepených spojů	28
3.1.2.	ČSN EN 14080 – Lepené lamelové dřevo – Smyková zkouška lepených spojů.....	29
3.1.3.	ČSN EN 302 – 1 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti	30
3.1.4.	EN 302-2 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 2.: Stanovení odolnosti proti delaminaci	30
4.	Výběr trvanlivostního testů s ohledem na další postup experimentálních prací	31
4.1.	ČSN EN 302 – 1 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti	31
4.1.1.	Podstata zkoušky	31
4.1.2.	Zkušební zařízení.....	31
4.1.3.	Příprava zkušebních těles	32
4.1.4.	Postup zkoušky	33
5.	Hygrotermální namáhání	34
5.1.	Teplotní namáhání	34
5.2.	Teplotně-vlhkostní namáhání	35
5.2.1.	Parametrické přístupy	35
5.2.2.	Model zrychleného stárnutí	35
6.	Cíl práce.....	38
7.	Popis experimentu	39
7.1.	Dřevina.....	39
7.2.	Uhlíkové saze.....	39
7.3.	Silanové aditivum (Silquest A137, Momentive TM)	41

7.3.1.	Charakteristika aditiva.....	41
7.3.1.	důvody využití Silquestu	41
7.4.	Epoxidový primer CHS 474/TELALIT 0492.....	42
7.4.1.	Nemodifikovaný primer	42
7.4.2.	Modifikace primeru pomocí plniva uhlíkových sazí (nevzdušující charakter).....	43
7.4.3.	Modifikace primeru pomocí plniva uhlíkových sazí (vzdušující charakter)....	43
7.5.	Epoxidové lepidlo CHS-EPOXY 531.....	44
7.5.1.	Charakteristika.....	44
7.5.2.	Vlastnosti epoxidového lepidla CHS-EPOXY 531	44
7.5.3.	Základní parametry vytvrzené směsi (CHS-EPOXY 531 a TELALIT 0492)....	44
7.6.	Výroba zkušebních těles	45
7.6.1.	Předpříprava povrchu	45
7.6.2.	Aplikace primeru	45
7.6.3.	Lepení desek.....	45
7.6.4.	Příprava zkušebních vzorků dle normy ČSN EN 302 - 1.....	46
7.7.	Exponování zkušebních těles.....	46
7.8.	zkoušení pevnosti a WF.....	48
7.8.1.	Zkoušení smykových pevností	48
7.8.2.	Kohezní porušení.....	49
7.9.	metodika hloubky proniku	50
8.	Výsledky zkoušek a diskuze.....	Chyba! Záložka není definována.
8.1.	Zkoušení smykové pevnosti a kohezního porušení ref. vzorků. Chyba! Záložka není definována.	
8.1.1.	Tabulkové hodnoty referenční zkušební vzorku 531+0492 Chyba! Záložka není definována.	
8.1.2.	Výsledky Pevnosti ve smyku a kohezního porušení	Chyba! Záložka není definována.
8.2.	Zkoušení smykové pevnosti a kohezního porušení ref. vzorků. Chyba! Záložka není definována.	
	531+0492 s modifikovaným primerem pomocí mikro carbonblack	Chyba! Záložka není definována.
8.2.1.	Tabulkové pevnosti a kohezní porušení s modifikací MCB Chyba! Záložka není definována.	
8.2.2.	Výsledky Pevnosti ve smyku a kohezního porušení	Chyba! Záložka není definována.
8.3.	Zkoušení smykové pevnosti a kohezního porušení zkušebních vzorků 531+0492 s modifikovaným primerem pomocí nanocarbonblack ... Chyba! Záložka není definována.	
8.3.1.	Tabulkové pevnosti a kohezní porušení s modifikací NCB. Chyba! Záložka není definována.	
8.3.1.	Výsledky Pevnosti ve smyku a kohezního porušení	Chyba! Záložka není definována.

9.	Závěr.....	Chyba! Záložka není definována.
10.	Literatura:	60
11.	Seznam použitých zkratek:	62
12.	Přílohy	63
12.1.	A – referenční vzorky.....	63
12.2.	B – modifikace pomocí MCB	64
12.3.	C – modifikace pomocí NCB	69

1. Úvod

Dřevo jako stavební prvek je snadno dostupným přírodním materiálem. Jednou z hlavních předností je, že z ekologické stránky je zahrnován mezi obnovitelné zdroje energie. Dřevo je významným stavebním prvkem, kde mezi přednosti můžeme počítat dobrou tepelně izolační vlastnost, vysokou pevnost, estetiku, dobrou opracovatelnost nebo to, že je to materiál velmi lehký. Mezi nedostatky pak můžeme počítat citlivost ke změnám vlhkosti, vysokou hořlavost případně možné napadení dřevními škůdci jako jsou houby či dřevokazní živočichové.

V dnešní době se nedostatky snažíme eliminovat zpracováním dřevní hmoty na kompozitní materiály při zachování jejích předností. Tyto kompozitní materiály se vyrábí nejčastěji lepením, ať už se jedná o výrobu plošných aglomerovaných dílců na bázi dřeva o různé tloušťce, nebo tyčových lepených dřevěných prvků.

Lepení dřevěných konstrukcí má ve srovnání s mechanickými metodami spojování značné výhody. Při použití lepidla se rozloží zatížení a napětí po celé ploše spoje a rovnoměrně se přenesou i statické a dynamické zatížení. Lepený spoj je proto odolnější vůči ohybům a vibracím než spoje mechanické. Lepidlem se zároveň lepené spoje také utěsní, takže v nich nedochází ke korozi jako v mechanicky spojených konstrukcích.

Při zvažování, jaká lepidla použít, je pochopitelně třeba přihlídnout k některým dalším faktorům. Návrh typu lepidla musí vycházet z různých požadavků na lepený spoj, ať už z hlediska chemické kompatibility s lepeným adherendem, nebo z hlediska technologie vlastního lepení. V poslední řadě by mělo vykazovat i dostatečnou trvanlivost vůči prostředí, kterému bude vystaveno. Díky tomu jsou navrhovány četné analytické metody, které využíváme k ověření dostatečné kvality lepeného spoje, většinou založeny na sledování pevnostních, chemických či strukturních parametrů zkoušeného vzorku.

2. Lepené spoje – požadavky na zkoušení

Při lepení spojů musí být dodrženy normativní požadavky lepených spojů daných konkrétními předpisy. Platné technické předpisy lze v současné době rozčlenit na:

- a) normy zabývající se lamelovým dřevem;
- b) normy zabývající se vrstveným dřevem;
- c) normy zabývající se požadavky na lepidla.[1]

Z důvodů experimentu spadajícím pro hodnocení lepidel určených pro nosné dřevěné prvky, se následující teoretická část bude více zaměřovat na téma požadavků určených pro lepené lamelové prvky. Rovněž je provedena rešerše týkající se běžně používaných lepidel a normových požadavků na ně kladených.

2.1. *Lepené lamelové dřevo*

Lepené lamelové dřevo je vysokohodnotný konstrukční materiál, který má řadu předností proti rostlému dřevu. Pro únosnost lepeného lamelového dřeva má prvořadý význam třídění lamel podle pevnosti, jakost zubovitých spojů a také jakost lepených spojů. Strojní třídění dřeva na základě hustoty a modulu pružnosti je klíčem pro vysokohodnotné lepené lamelové dřevo[1].

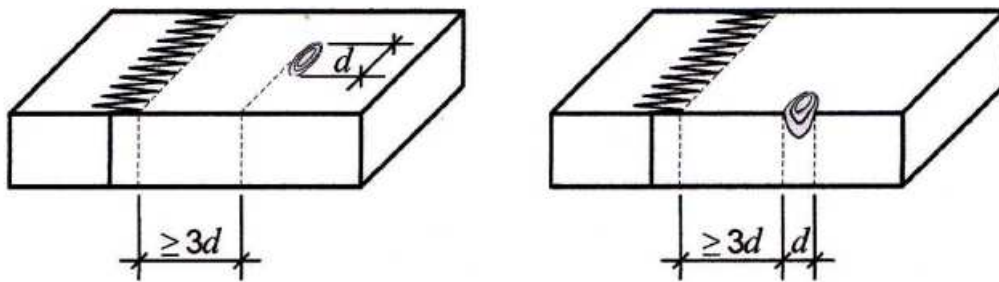
Dřevo používané pro lepené lamelové dřevo musí být tříděno vizuálně či strojně, přičemž musí vykazovat charakteristické hodnoty pevnosti v ohybu, pevnosti v tahu, pevnosti v tlaku, pevnosti ve smyku, modulu pružnosti a hustoty podle metody uvedené níže.

Vizuální třídění dle pevnosti

Suky

Největší rozměry suků popř. otvorů po suku musí být předepsány jedním z těchto způsobů. U některých prvků ovlivňují pevnost skupinové suky, ke kterým se musí přihlížet.

- a) V závislosti na šířce nebo tloušťce prvku dřeva na základě lineárních hodnot
- b) V závislosti na průřezu prvku (průřezové hodnoty)
- c) V závislosti na absolutních hodnotách pro daný rozsah rozměrů prvku



Obr. č. 1: nejmenší vzdálenosti suku u zubovitého spoje (d = průměr suku)

Odklon vláken:

V normě pro třídění musí být definován odklon vláken dle EN 844-9, pro metodu jeho měření musí být pak uvedeny hodnoty odklonu vláken pro každou předepsanou jakostní třídu.

Hustota a průměrná šířka letokruhu:

Musí být popsány požadavky buď na hustotu (při dané vlhkosti nejvíce používaných je 20%), nebo na průměrnou šířku letokruhu, kde se přednostně používají tyto šířky letokruhu: 15, 10, 8, 6, 4 a 3mm.

Trhliny:

Trhliny se mohou zanedbat, pokud nemají významný vliv kupříkladu na pevnost nosníku ve smyku za ohybu. Největší délka trhlin nesmí přesahovat hodnoty popsané v tabulce [27].

Obliny (geometrická charakteristika):

Největší dovolená oblina nesmí redukovat rozměry boku a plochy na méně než 2/3 základních rozměrů prvku.

Zakřivení (geometrická charakteristika):

Největší hodnoty zakřivení nesmějí být větší, než stanovuje tabulka 1[27]:

Tab. č. 1: Požadavky na vizuální kontrolu s největší celkovou délkou trhlin v prvku dřeva

Třída pevnosti dle EN 338		C18 a nižší	Nad C18
Největší dovolená tloušťka trhlin		Trhliny s hloubkou menší než polovina tloušťky se mohou zanedbat	
	Trhliny neprocházející tloušťkou	Ne více než 1,5 m nebo ½ délky prvku, rozhodující je menší hodnota	Ne více než 1 m nebo ¼ délky prvku, rozhodující je menší hodnota
	Trhliny procházející tloušťkou	Ne více než 1 m nebo ¼ délky prvku, rozhodující je menší hodnota. Pokud jsou trhliny na koncích nesmí být větší než 2x šířka prvku	Jsou dovoleny pouze na koncích s délkou nepřesahující šířku prvku
Největší zakřivení v mm na 2 m délky	Podélné zakřivení ve směru tloušťky	20 mm	10 mm
	Podélné zakřivení ve směru šířky	12 mm	8 mm
	Šroubové zakřivení	2 mm/25 mm šířky	1 mm/25 mm šířky
	Příčné zakřivení	Neomezuje se	Neomezuje se
Oblina		Oblina nesmí být větší než 1/3 plného rozměru boku či plochy prvku	
Měkká hniloba a tvrdá hniloba		Měkká hniloba se nedovoluje, tvrdá hniloba se dovoluje	Měkká hniloba se nedovoluje, tvrdá hniloba se nedovoluje
Poškození hmyzem		Aktivní napadení se nedovoluje, otvory po hmyzu se stanovují jako abnormální vady	
Abnormální vady		Nebereme v úvahu pokud se vada nebude zvětšovat po zpracování a vysoušení	

Strojní třídění dle pevnosti

Pro třídu a dřevinu, tříděné systémem s kontrolou vztáženou na stroj musí být nastavené hodnoty pro celou růstovou oblast, ze které bude dřevo tříděno. Vizuální charakteristiky každého prvku strojně tříděného dřeva musí vyhovovat požadavkům pro třídu, které mohou dosáhnout nejvýše hodnot uvedených v tabulce 2. Trhliny, zakřivení a odklon musí být měřeny dle EN 1310. Kupříkladu u ohybových strojů pokud nedochází ke třídění až ke koncům každého prvku dřeva, musí se tyto neúplně tříděné části kontrolovat vizuálně. Prvek pak vyřadíme, pokud překročí hodnoty uvedené v tabulce 2.

Tab. č. 2: Požadavky na vizuální kontrolu pro oblasti neúplně tříděné strojně

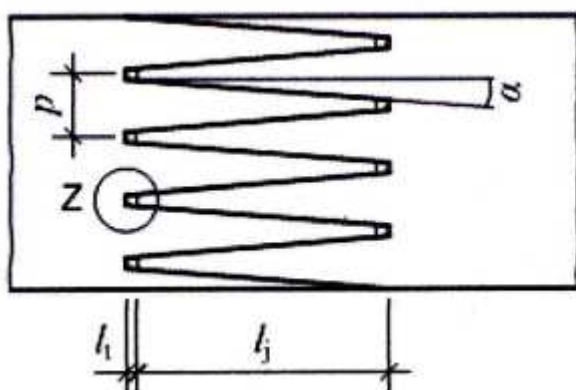
	Třída pevnosti dle EN 338	
	C18 a nižší	nad C18
Průměr suku v ploše	$\frac{1}{2}$ x šířka prvku	$\frac{1}{4}$ x šířka prvku
Průměr suku na boku	$\frac{3}{4}$ x tloušťka prvku	$\frac{1}{4}$ x tloušťka prvku
Odklon vláken	1 : 6	1 : 10

2.1.1. Výroba lepeného lamelového dřeva

Lepené lamelové dřevo se vyrábí z řeziva s konečnou tloušťkou nejvýše 45 mm a délkou mezi 1,5 – 5,0 m. Řezivo skladované ve venkovním prostředí, se posléze musí vysušit. Důvodem nutného vysušení je, že používaná lepidla vyžadují vlhkost dřeva nejvýše 15%. Po sušení se řezivo předběžně frézuje a posléze třídí. Kontroluje se vlhkost dřeva, řezivo se kapuje a ukládá do hrání[1].

Nastavování zubovitým spojem:

Přířezy se na čelních koncích vzájemně spojují zubovitým spojem a vytvářejí tak tzv. nekonečnou lamelu. Typický zubovitý profil s označením je blíže specifikován v ČSN EN 14080 a znázorněn na obrázku níže. Zubovitý profil se vyfrézuje v čele a nanese se lepidlo. Potom se přířezy slisují po obou nejméně dvou sekund, takže jsou třením působícím mezi ozuby drženy pohromadě. Z výsledné nekonečné lamely se odřezávají lamely požadované délky a ukládají se do hrání. Doba tohoto meziskladování musí být zvolena tak, že je zaručeno vytvrzení lepidla, než se bude pokračovat s dalším zpracováním lamel[1].



Legenda:

- l_j délka ozubu
- p rozteč ozubu
- α sklon ozubu
- l_t vůle v zubovitém spoji
- b_t šířka tupého zakončení ozubu

Obr. č. 2: Typický profil zubového spoje

Lepení, Lamely se frézují a nanáší se lepidlo. Lamely se uloží nastojato vedle sebe a zalisují se. Lisovací přípravky umožňují výrobu přímých a zakřivených nosníků. Po lisování (většinou až do příštího dne) se nosníky skladují až do konečné úpravy[1].

Konečná úprava, Nosníky se frézují z bočních stran pro odstranění zbytku lepidla a dosažení rovinných povrchů. Nakonec následuje konečná úprava nosníků. Konečná úprava zahrnuje všechna předběžná a přípravná opatření, která se musí provádět na staveništi (např. vrtání otvorů pro spojovací prostředky nebo aplikace ochranných látek na dřevo) [1].

Příprava lepidel, nepřivádí-li se pryskyřice a lepidlo přímo ze skladovacích nádrží a nemíchají-li se automaticky při nanášení, musí být k dispozici samostatný prostor pro přípravu lepidla (smíchání pryskyřice a tvrdidla). Kromě toho musí být vytvořeny možnosti pro vhodné skladování pryskyřice a tvrdidla a prostor pro čištění zařízení na lepení [1].

2.1.2. Požadavky na prkna

Musí být splněny požadavky na prkna uvedené v tabulce 3.

Tab. č. 3: Charakteristické vlastnosti pevnosti a tuhosti pro T-třídy v MPa a hustoty v kg/m³ pro prkna nebo fošny pro lepené lamelové dřevo

T-třída prken a fošen (*)	F _{t,0,l,k}	E _{t,0,l,mean}	ρ _{lk}
T8 (C14)	8	7 000	290
T9	9	7 500	300
T10 (C16)	10	8 000	310
T11 (C18)	11	9 000	320
T12 (C20)	12	9 500	330
T13 (C22)	13	10 000	340
T14 (C24)	14	11 000	350
T14,5	14,5	11 000	350
T15	15	11 500	360
T16 (C27)	16	11 500	370
T18 (C30)	18	12 000	380
T21 (C35)	21	13 000	390
T22	22	13 000	390

T-třída prken a fošen (*)	F_{t,0,l,k}	E_{t,0,l,mean}	ρ_{lk}
T24 (C40)	24	13 500	400
T26	26	14 000	410
T27 (C45)	27	15 000	410
T28	28	15 000	420
T30 (C50)	30	15 500	430

Pozn.: ()Třídy C dle EN 338 splňují nejméně požadované hodnoty příslušných T-tříd*

2.1.3. Požadavky, užité vlastnosti a výrobní požadavky:

Požadavky předepsané v ČSN EN 14080 slouží k dosažení výroby spolehlivých a trvanlivých lepených spojů tak, aby jakost lepení byla zachována po uvažovanou dobu životnosti stavebního objektu.

Požadavky na jakost lepených spojů musí být založeny na zkouškách lepených spojů na zkušebním tělese plného průřezu, které se odřeže z konstrukčního prvku z lepeného lamelového dřeva. Podle třídy použití konstrukce se provádí zkoušky dle ČSN EN 14080, tyto zkoušky jsou popsány níže[27].

2.1.3.1. Požadavky na třídění lepeného lamelového dřeva

Dřevo používané pro lepené lamelové dřevo musí být tříděno vizuálně či strojně, přičemž musí vykazovat charakteristické hodnoty pevnosti v ohybu, pevnosti v tahu, pevnosti v tlaku, pevnosti ve smyku, modulu pružnosti a hustoty podle metody uvedené níže.

2.1.3.2. Požadavky na mechanickou odolnost lepeného lamelového dřeva

V této části jsou zařazeny charakteristiky jako: modul pružnosti, pevnost v ohybu, tlaku, tahu a smyku. Mechanická odolnost se musí stanovit na základě geometrických údajů (průřezové rozměry) a vlastností materiálů (pevnost, hustota atp.) [27].

Homogenní lepené lamelové dřevo

Charakteristická pevnost, tuhost a hustota mohou být deklarovány odkazem na třídu pevnosti dle tabulky 4. Výrobky jsou značeny GL **xxh**, kde **xx** jsou výsledné pevnost v ohybu a **h** znamená homogenní. Charakteristická pevnost v ohybu platí pro lepené lamelové dřevo s výškou 600 mm a tloušťkou lamel 40 mm.

Tab. č. 4: Charakteristické vlastnosti pevnosti a tuhosti v N/mm^2 a hustoty v kg/m^3 pro homogenní lepené lamelové dřevo. (hodnoty v závorce jsou hodnoty kombinovaného lamelového dřeva)

Vlastnost	Značka	Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
		GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Pevnost v tahu	$f_{t,0,g,k}$	16(15)	17,6(16)	19,2(17)	20,8(19)	22,4(19,5)	24(20)	25,6(20)
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Pevnost v tlaku	$f_{c,0,g,k}$	20(18,5)	22(20)	24(21,5)	26(23,5)	28(24)	30(25)	32(25)
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Pevnost ve smyku	$f_{v,g,k}$	3,5						
Pevnost ve valivém smyku	$f_{r,g,k}$	1,2						
Modul pružnosti	$E_{0,g,mean}$	8 400	10 500	11 500	12 000	12 600	13 600	14 200
	$E_{0,g,05}$	7 000	8 800	9 600	10 100	10 500	11 300	11 800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
M.P. ve smyku	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540(542)						
M.P. ve valivém smyku	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Hustota	$\rho_{g,k}$	340(355)	370(355)	385(365)	405(385)	425(390)	430(390)	440(400)
	$\rho_{g,mean}$	370(390)	410(390)	420(400)	445(420)	460(430)	480(430)	490(440)

Charakteristická pevnost v ohybu se může stanovit dle vztahu:

$$f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \left(\frac{f_{m,j,k}}{1,4} - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65} \quad [1]$$

Charakteristická pevnost v ohybu na ležato zubovitého spoje lze stanovit takto:

$$1,4f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4f_{t,0,l,k} + 1 \quad [2]$$

Charakteristická pevnost v tahu $f_{t,0,g,k}$ se uvažuje jako 80 % charakteristické hodnoty pevnosti v ohybu $f_{m,g,k}$.

Kombinované lepené lamelové dřevo

Lepené lamelové dřevo o průřezu, jehož vnitřní a vnější lamely náležejí k různým třídám pevnosti nebo specifickým třídám pevností určeným výrobcem. Kombinované lepené lamelové dřevo se značí GL 20c, kde c znamená kombinované (*combinated*). Hodnoty charakteristických vlastností pevnosti, tuhosti a hustoty kombinovaných lamelových prvků jsou znázorněny v tabulce 4 v závorce za hodnotou udávající homogenní lamelové dřevo.



Obr. č. 3: Příklad skladby nosníku z kombinovaného lamelového dřeva

2.1.3.3. Požadavky na lepidla pro lepené lamelové výrobky

Pro lepené lamelové výrobky použité ve třídě provozu 1 se musí použít lepidla, které lze přiřadit k typu lepidla I nebo II dle normy ČSN EN 301. Pro lepené lamelové výrobky použité ve třídě provozu 2 nebo 3 se musí použít lepidla, která lze přiřadit k typu lepidla I opět dle normy ČSN EN 301.

2.2. Lepidla

Lepidla pro nosné dřevěné prvky se používají pro vzájemné spojování dvou či více částí dřeva takovým způsobem, že staticky působí jako celek. Úloha lepidla spočívá ve vyplnění spar mezi dřevěnými prvky a vytvoření adhezního spojení mezi jednotlivými prvky, které je stejně pevné a trvanlivé jako kohezní síly uvnitř prvku. Samotná vrstva lepidla musí kromě toho vykazovat dostatečnou pevnost a trvanlivost, aby v uvažované třídě použití byla v průběhu předpokládané životnosti konstrukce trvale účinná [1].

Výsledné vazebné síly jsou převážně 2. druhu, tj. vodíkové vazby a van der Waalsovy síly. Proces lepení sestává ze dvou stupňů:

- I) Nanesení tekutého lepidla, které smáčí povrchy obou spojovaných částí tak, že ve styčných plochách vznikají stažlivé síly mezi lepidlem a molekulami dřeva.

II) Přejít tekutého lepidla, které vyplňuje spáry mezi jednotlivými částmi, do pevné fáze s dostatečnou pevností a trvanlivostí během doby životnosti konstrukce. Tento proces se označuje jako **vytvrzování** a probíhá třemi způsoby:

- 1) Fyzikálním procesem, jako např. přeměnou roztoku nebo tuhnutím taveniny (termoplastická lepidla jako je PVAc a tavná lepidla)
- 2) Chemickým procesem, při němž molekuly v lepidle vzájemně reagují a vytvářejí vazby 1. stupně a polymerní zesílení.
- 3) Kombinací přeměny roztoku a chemické reakce (močovinová, melaminová, fenolická a rezorcínoformaldehydová lepidla).

2.2.1. Klasifikace lepidel

V současné době existuje pouze jedna zavedená evropská norma pro klasifikaci lepidel pro dřevěné konstrukční prvky a to norma EN 301. Dle EC5 se smí používat pouze lepidla, která vyhovují podmínkám ČSN EN 301.

Odpovídající zkušební norma je ČSN EN 302, část 1 až 7. Tyto normy se vztahují pouze na fenolická a aminová lepidla, která se rozdělují:

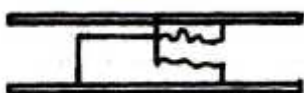
- I) Lepidla typu I, která jsou trvanlivá při neomezené venkovní expozici o teplotách nad 50 °C a trvanlivá při teplotách nižších než 50°C a relativní vlhkosti vzduchu vyšší než 85% při teplotě 20°C.
- II) Lepidla typu II, pro použití ve vytápěných a větraných budovách, venkovním prostředí chráněném proti povětrnosti, při krátkodobém působení povětrnosti a při teplotách nejvýše 50 °C.

Tab. č. 5: Nejmenší hodnoty pevnosti ve smyku pro zatřídění lepidel dle EN 301 [20]

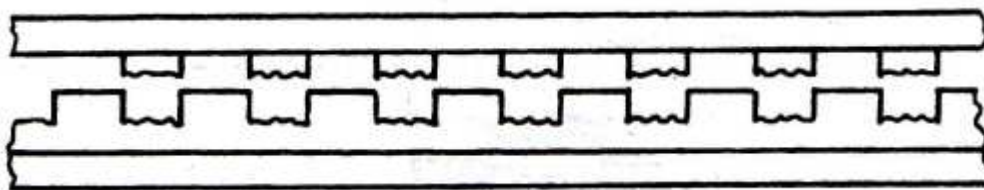
Druh expozice	Minimální střední hodnota smykové pevnosti [N.mm ⁻²]			
	tl. 0,1 mm lepeného spoje		tl. 1,0 mm lepeného spoje	
	TYP I	TYP II	TYP I	TYP II
A1	10,0	10,0	8,0	8,0
A2	6,0	6,0	4,0	4,0
A3	8,0	8,0	6,4	6,4
A4	6,0	<i>Nepožaduje se</i>	4,0	<i>Nepožaduje se</i>
A5	8,0	<i>Nepožaduje se</i>	6,4	<i>Nepožaduje se</i>

2.2.2. Hlavní typy porušení lepeného spoje

Pro určení porušení lepeného spoje platí příslušná norma dle ČSN ISO 10365. Tato norma uvádí hlavní označení typů porušení lepeného spoje, a ilustruje typ porušení pomocí obrázků. Lze normu použít pro všechny mechanické zkoušky lepených spojů, bez ohledu na povahu adherendu a lepidla, tvořících lepený spoj. Adhezní porušení je definováno jako prasknutí lepeného spoje, které se zjevně projeví oddělením na rozhraní lepidlo/adherend. Kohezní porušení je pak definováno jako prasknutí lepeného spoje, při kterém se oddělení zjevně projeví buď v lepidle nebo adherendu.




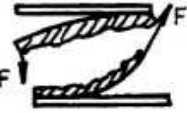


Obr. č. 4: *Příklad kombinovaného porušení AF (50 %) + CF (50 %)*



Obr. č. 5: *Příklad střídavého porušení*

Označování typu porušení lepeného spoje se používá při klasifikaci typu porušení za účelem lepšího posouzení výsledku mechanické zkoušky adheze lepeného spoje, který je obvykle vyjádřen kvantitativně naměřenou hodnotou. Typy porušení jsou pak znázorněny na obrázku 6. Objeví-li se více než jeden typ, uvede se za každým označením procentuelní vyjádření jednotlivého typu porušení (viz obr. 4) [23].

Lepidlo	Typy kohezního porušení		
		Kohezní porušení	CF
		Speciální kohezní porušení	SCF
		Adhezní porušení	AF
		Adhezní a kohezní porušení	ACFP

Obr. č.:6: Označení a znázornění různých typů porušení

2.2.3. Výběr laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů

Dle ČSN ISO 9142 jsou popsány laboratorní podmínky stárnutí, na nichž mohou být lepené spoje exponovány různým vnějším vlivům (povětrnostním nebo chemickým), aby se zjistily jejich účinky na požadované vlastnosti. Tyto zmíněné podmínky stárnutí se používají pro lepené spoje a mohou být využity pro vytvoření souboru testů k hodnocení lepidla.[24]

2.2.3.1. Zkušební zařízení

Klimatizační komora, vyhovující podmínkám a požadavkům ISO 483, schopná udržovat teplotu (23 ± 2 °C) a relativní vlhkost (50 ± 5 %).

Sušárna, produkující suché teplo, s cirkulací vzduchu a s možností nastavení teploty v rozsahu od 20 °C do 200 °C.

Vlhkostní komora, vyhovující požadavkům ISO 483, s možností nastavení vlhkosti od 25 % do 100 %. Komora musí obsahovat zařízení měřící teplotu s přesností na 1 °C, zařízení měřící vlhkost s přesností na 3 % relativní vlhkosti

Chladicí komora, nastavitelná na teplotu (-20 ± 3) °C a (-40 ± 3) °C

Regulovaná tlaková komora, schopná pracovat při tlaku 0,6 MPa a podtlaku 0,092 MPa.

2.2.3.2. Zkušební tělesa

Počet zkušebních těles závisí na měřených vlastnostech a požadovaných podmínkách stárnutí. Před stárnutím se tělesa musí všechny kondicionovat v klimatizační komoře minimálně po dobu 24 hodin. Může se kondicionovat dle vytvrzení lepidla, předpisu výrobce či podle materiálové normy. Stárnutí kondicionovaných těles probíhá exponováním dle podmínek uvedených v popisech jednotlivých druhů stárnutí:

- I. Všeobecné podmínky stárnutí – Používají se přednostně používané teploty, doba expozice i relativní vlhkosti uváděné v této normě.
- II. Klimatické podmínky stárnutí při jedné proměnné – Při tomto typu stárnutí se uvažuje pouze s jednou proměnnou (např. teplota), ostatní jsou konstantní
- III. Klimatické podmínky stárnutí při více proměnných – při tomto stárnutí se uvažuje souběžný vliv dvou či více klimatických proměnných působících na zkušební těleso.
- IV. Klimatické podmínky cyklického stárnutí – zde je zkušební těleso vystaveno ve více po sobě jdoucích časových intervalech klimatických podmínek s jednou či více proměnnými.
- V. Expozice účinku chemikálii – při těchto postupech je nutné se řídit dle ISO 175:1999

- VI. Speciální postupy – jako speciální postupy se berou – expozice v neutrální solné mlze, expozice vody ve vlhkém tlakovém obalu, expozice laboratorním zdrojům světla nebo expozice v neutrální solné mlze při zvýšené teplotě a vlhkosti.

Zkoušky po stárnutí, Hodnoty požadovaných vlastností po stárnutí se stanoví dle postupů definovaných v příslušných normách (I - VI). Spolu s výsledky zkoušek se musí zaznamenat všechny změny viditelné během stárnutí, hodnocení a typu porušení lepeného spoje.

Vyjádření výsledků, Výsledné hodnoty se vyjadřují buď jako absolutní hodnota, nebo jako relativní odchylka vztažená na původní hodnotu. U neměřitelných vlastností se udává typ porušení.[24]

2.2.4. Vybrané současné druhy lepidel pro nosné dřevěné konstrukce

Rezorcínoformaldehydová (RF) a fenolrezorcínoformaldehydová (PRF) pryskyřičná lepidla:

Čistá rezorcínová pryskyřice se získá reakcí rezorcínu (fenolická sloučenina) s formaldehydem. Do tekutého lepidla se přidá tvrdidlo, které obsahuje formaldehyd a tím se proces tuhnutí ukončí. Tvrdidlo zpravidla navíc obsahuje chemicky neaktivní plniva různého druhu, která lepidlu dodávají vlastnosti pro vyplnění spáry. Protože rezorcínová pryskyřice je drahá, nahrazuje se jinými, levnějšími fenoly. Oba druhy lepidla vytvrzují při pokojové teplotě (15 - 20°C) nebo i při zvýšených teplotách. Při reakci formaldehydu s rezorcínem vznikají sloučeniny -C-C-. Tyto sloučeniny jsou velmi pevné, stále a nejsou rozpustné ve vodě.

Fenolformaldehydová (PF) pryskyřičná lepidla pro lepení za studena

Pro vytvrzení PF lepidel při pokojové teplotě je potřebné kyselé prostředí. To není ve vodorozpustné formě možné, protože kyselina by pryskyřici vysrážela. Lepidlo proto musí být rozpuštěno v alkoholu a k vytvrzování dochází přidáním silné kyseliny. Lepené spoje mají stejnou pevnost a trvanlivost jako v případě jiných PF lepidel. Tvrdidlo je však tak silná kyselina, že nelze vyloučit poškození dřeva.

Močovinoformaldehydová (UF) pryskyřičná lepidla

UF lepidla se vyrábějí reakcí močoviny s formaldehydem. Reakce se urychluje kyselinou a přívodem tepla. Na vhodném stupni se reakce zastaví ochlazením a neutralizací. Proces se obnoví přidáním tvrdidla odebírajícího kyselinu a u určitých druhu lepidel navíc

přívodem tepla. Tato lepidla jsou dostupná v tekuté formě nebo jako prášek se vytvrzují se při teplotě 100 °C. Lepené spoje mají světlou barvu.

Melaminmočovinoformaldehydová (MUF) pryskyřičná lepidla

Tato lepidla jsou podobná UF lepidlům, přičemž část močoviny je nahrazena melaminem, aby se dostalo vyšší odolnosti proti vodě a povětrnosti. Pro zlepšení těchto vlastností obsahují některá lepidla rezorcín. MUF lepidla lze používat pro lisování za horka např. pro překližku se střední odolnosti proti vodě a pro lepení za studena nebo za tepla lepeného lamelového dřeva a zubovitých spojů.

Kaseinová lepidla

Hlavní součástí tohoto lepidla je mléčná bílkovina kasein. Lepidlo je dodáváno jako prášek, který pozůstává z kaseinu a různých anorganických solí. Když se prášek zamíchá do vody, probíhá řada chemických procesů. Asi po 15 minutách se kasein rozpustí na kaseinát sodný. Po 4 až 8 hodinách je uskutečněna přeměna na kaseinát vápenatý, který je téměř nerozpustný ve vodě. Odolnost proti vodě není jako u UF lepidel, ale jsou odolnější proti současnému namáhání teplem a vysokou relativní vlhkostí vzduchu.[1]

Tab. č.6: *Vhodnost současných lepidel pro nosné dřevěné prvky*

Podmínky prostředí	RF/PRF	PF	MUF	UF	Kasein
Venkovní	+	1	(+)	x	x
>50°C	+	+	(+)	x	x
>85 % RV vzduchu	+	+	(+)	x	x
Pod vodou	+	+	x	x	x
≤ 50°C, ≤ 85% RV na vzduchu	+	+	+	+	+
Barva lepených spar	tmavá	tmavá	světlá	světlá	světlá
Typ podle EN	301-1	-	301-I/II	301-I/II	-

+ vhodné, x nevhodné, (+) některé druhy vhodné, - existujícími normami EN neupraveno

2.2.5. Nová potencionální lepidla pro nosné dřevěné prvky

Epoxidová lepidla

Dvousložkové lepidlo obsahující epoxidovou pryskyřici, jejíž molekuly jsou vázány epoxidovými skupinami a složku obsahující obvykle dvě aminové slupiny. Mají velmi dobrou schopnost pro vyplnění spáry. Vzhledem k vysoké ceně je použití omezené.

Dvousložková polyuretanová lepidla

Složka I obsahuje dvě nebo tři izokyanátové skupiny a složka II dvě nebo tři OH skupiny. Obě složky jsou bez rozpouštědel. Při smíchání těchto dvou složek se vytvoří polyuretanová pryskyřice. Tato lepidla vykazují vysokou pevnost a dobrou trvanlivost, ale ne všechna jsou odolná proti vodě.

Jednosložková polyuretanová lepidla

Reaktivní složkou je izokyanát. Při nanesení na dřevo reaguje jedna jeho část s vlhkostí dřeva a přemění se na amin. Ten opět reaguje se zbývajícím izokyanátem a vytvoří polyuretanovou pryskyřici. V průběhu vytvrzování se tvoří kysličník uhličitý a to vede u tlustých lepených spar k lepidlové pění. Pevnost a trvanlivost odpovídá dvousložkovým PU lepidlům, nebo jsou nepatrně nižší. Lepidla však nemají vlastnost pro vyplnění spáry.

Emulzní polymerní izokyanáty (EPI)

Složka I je emulgovaný polymer, např. PVAC a složka II tzv. zastavený emulgovaný izokyanát. Když lepený spoj vysychá, izokyanát je odevzdán a působí jako zesilovač. Pevnost a trvanlivost jsou u těchto lepidel označovány jako velmi dobré.[1]

Tab. č. 7: Vybrané druhy nových potencionálních konstrukčních lepidel

Vlastnost	Epoxidové	2-složkové PU	1-složkové PU	EPI
Odolnost proti povětrnosti	?	?	?	?
Odolnost proti teplu	?	?	?	?
Odolnost proti vodě	?	?	?	?
Dotvarování	?	?	?	?
Tuhost	+	+	+	+
Vyplnění spáry	+	+	÷	÷

Vlastnost	Epoxidové	2-složkové PU	1-složkové PU	EPI
Adheze	?	+	+	-
Vhodnost použití	÷	÷	÷	+
Vytvrzovací doba	-	-	-	+

+ Dobrá, pravděpodobně lepší než u lepidel používaných v současnosti

- Porovnatelná se současnými lepidly

÷ horší než u současných lepidel

? nejistá, velké rozdíly mezi jednotlivými výrobky

3. Trvanlivost lepených dřevěných spojů

Pro výběr lepidla pro danou aplikaci jsou nejdůležitější aspekty jako podmínky okolí nebo prostředí, jimž bude daný lepený spoj vystaven. Jedním z hlavních aspektů je dále síla působící na lepený spoj.

Lepený spoj musí být schopen unést maximální předpokládané zatížení (bez nadměrného tečení - creepu), tak odolávat cyklickému zatížení. Střídavé namáhání, obzvláště pomalé frekvence, poškozuje lepený spoj poměrně více než namáhání stálé. Vybrané lepidlo v konkrétní aplikaci musí odolávat tomuto zatížení nejen na počátku, ale také poté, co bylo během životnosti spoje trvale vystaveno vlivům prostředí. Teplota a vlhkost bývají obvykle neškodlivějšími faktory pro většinu lepených spojů [2].

Trvanlivost lepených dřevěných spojů se obvykle provádí normovými postupy, které víceméně sestávají z expozice dřevěných lepených spojů vlhkostním změnám. Právě objemové změny dřeva vyvolané změnou vlhkosti vyvolávají napětí na lepenou spáru, které může vést k následné delaminaci spáry (ztrátě adhezních sil), případně k celkovému snížení pevnosti lepeného spoje (zkoušeno pomocí smykové zkoušky). Mezi základní normy určující typy cyklování lepených spojů patří následující normy, které posuzují:

1) Trvanlivost lepených prvků,

2) Lepidla.

3.1. Zkoušení lepeného lamelového dřeva

3.1.1. EN 14080 - Lepené lamelové dřevo – Zkouška delaminace lepených spojů

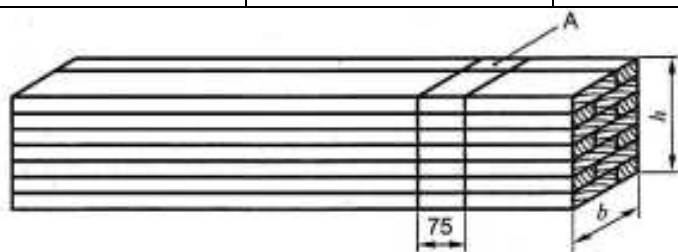
Norma specifikuje tři normové postupy delaminace pro průběžnou kontrolu jakosti lepených dřevěných spojů lepeného lamelového dřeva (konstrukční prvek vytvořený slepením dřevěných lamel s převážně rovnoběžnými vlákny). Normovým postupem je zjišťována tzv. *délka delaminace*, která je součtem délek delaminovaných spár na obou čelních plochách každého zkušební tělesa [27].

Zkušební cyklus se sestává z následujících etap:

- vložení těles do vody o teplotě 10 až 20 °C a vytvoření podtlaku nejméně 85 kPa po dobu 5 minut;
- zrušení vakua a vytvoření tlaku nejméně 600 kPa na dobu 4 hodiny;
- celý cyklus se na tělesa ponořená ve vodě opakuje;
- vysoušení probíhá po 21 až 22 hodin při teplotě vzduchu 60 až 70°C a relativní vlhkosti vzduchu 15%, rychlost cirkulace vzduchu je 2 až 3 m/s, při teplotě a relativní vlhkosti dle tabulky 8.
- výsledné hodnoty delaminace se vyjádří v procentech.

Tab. č. 8: *Klima v sušárně pro různé postupy*

	Postup A	Postup B	Postup C
Teplota (°C)	60 až 70	65 až 75	25 až 30
Relativní vlhkost (%)	< 15	8 až 10	25 až 35



Legenda

- A** = zkušební těleso
- b** = šířka > 300 mm
- h** = výška

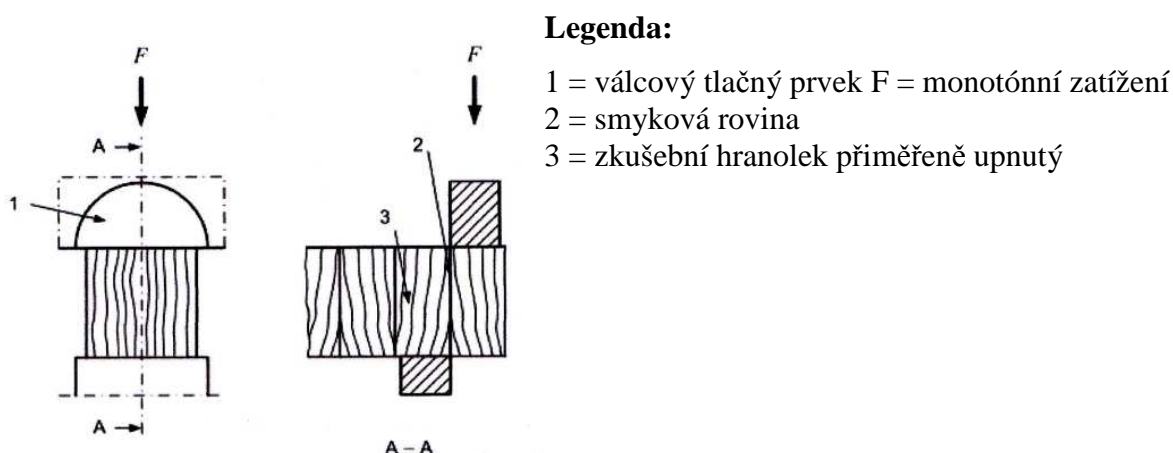
Obr. č. 7: *Zkušební těleso odřezané z lepeného lamelového prvku*

3.1.2. ČSN EN 14080 – Lepené lamelové dřevo – Smyková zkouška lepených spojů

Tato norma stanovuje metodu zjišťování smykové pevnosti lepeného spoje rovnoběžně s vlákny a je určena pro průběžnou kontrolu jakosti lepených spojů. Podstatou zkoušky je namáhání lepeného spoje až do porušení. Zkušební těleso může být hranol šířky (40-50)mm a tloušťky (40-50)mm. Nebo válec s opracovanými rovinnými plochami délky (70-80)mm, průměru cca 35mm, rovinné straně cca 23cm a tloušťce cca 26mm.[4]

Zkušební cyklus se sestává z následujících etap:

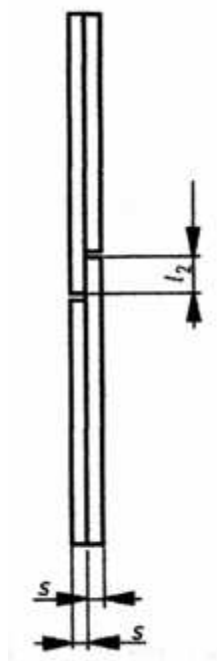
- kondicionování zkušebních těles ve standardním prostředí [20°C/65%] do ustálení vlhkosti vzorků v rozmezí 8% až 13%;
- změření vzorků a umístění do zkušebního zařízení;
- rychlost zatěžování taková, aby nedošlo k porušení dřív než za 20s;
- výpočet pevnosti smyku se zaokrouhlením na 2 desetinná místa v N/mm^2 a vizuální určení procenta porušení spoje.



Obr. č. 8: Smykový přípravek s vloženým zkušebním hranolkem

3.1.3. ČSN EN 302 – 1 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti

Tato metoda je vhodná pro lepidla pro nosné dřevěné konstrukce. Není vhodná pro získávání konstrukčních dat a nelze ji použít ke stanovení vhodnosti lepidel pro výrobu dílců ze dřeva. Smyková pevnost slepů se stanoví vložením podélné tahové síly na jednoduchý přeplátovaný spoj s tenkou (asi 0,1 mm) a silnou vrstvou lepidla ($1,0\pm 0,1$ mm). Zkušební vzorky by měly být délky (150 ± 5) mm, tloušťky ($10\pm 0,2$) mm a šířky ($20\pm 0,1$) mm. Délka zkoušené plochy je ($10\pm 0,1$) mm.[5]



Obr. č. 9: Zkušební vzorek dle normy ČSN EN 302-1

3.1.4. EN 302-2 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 2.: Stanovení odolnosti proti delaminaci

Tato zkouška se používá pro získání výkonnostních charakteristik sloužících pro zatřídění lepidel pro nosné dřevěné konstrukce podle jejich vhodnosti k použití v daných klimatických podmínkách. Principem normy je zjištění míry delaminace a to dvěma způsoby. Pro lepidla typu I a II (nízkoteplotní a vysokoteplotní postup).

Je vhodná pro posouzení shody lepidel s EN 301, pro posouzení vhodnosti lepidel a jakosti lepidel pro nosné dřevěné konstrukce a pro porovnání vlivů zvolených podmínek lepení, rozdílných klimatických podmínek a manipulace se zkušebními tělesy před a po slepení na pevnost slepu.

Není vhodná ke zjišťování numerických konstrukčních hodnot a nepředstavuje chování lepených prvků a použití. Není určena pro posouzení vhodnosti lepidel pro výrobu dílců ze dřeva.[6]

Zkušební cyklus se sestává z následujících etap:

- impregnace vzorků ve vodě o teplotě $10 - 25^{\circ}\text{C}$, absolutním tlaku 25 ± 5 kPa po dobu 15 minut;
- impregnace vzorků ve vodě o teplotě $10 - 25^{\circ}\text{C}$, absolutním tlaku 600 ± 25 kPa po dobu 1 hodiny;
- sušení vzorků cirkulujícím vzduchem po dobu 20 minut proudícím rychlostí $2,25 \pm 0,25$ m/s, o teplotě 65 ± 3 °C;
- celý cyklus se opakuje třikrát;
- hodnocení delaminace se provede do hodiny po ukončení zkoušky, hodnoty se měří v mm.

4. Výběr trvanlivostního testů s ohledem na další postup experimentálních prací

4.1. ČSN EN 302 – 1 - Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti

4.1.1. Podstata zkoušky

Smyková pevnost slepu se stanoví vložením podélné tahové síly na jednoduchý přeplátovaný spoj s tenkou a silnou vrstvou lepidla mezi dvěma pravoúhlými adherendy z bukového dřeva. Spoje jsou namáhány, dokud nedojde k porušení.

4.1.2. Zkušební zařízení

Musí pracovat při:

- a) konstantní rychlosti zatěžování ($2,0 \pm 0,5$) kN/min; nebo
- b) konstantní rychlosti posuvu čelistí nepřesahující 5mm/min tak, aby doba potřebná k porušení byla mezi 30s a 90s.

Zkušební zařízení musí zajistit, aby tahové namáhání ve smyku neprobíhalo excentricky a aby nedocházelo během zatěžování k prokluzu.

4.1.3. Příprava zkušebních těles

Připraví se 2 desky ze silného nenapařeného, ohoblovaného, rovně rostlého smrkového prkna s hustotou $(450 \pm 50) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ při vlhkosti dřeva $(12 \pm 1) \%$. Všechny desky použité pro stejné cyklické namáhání musí být připraveny ze stejného prkna. Úhel mezi letokruhy a lepenými plochami musí být 30° až 90° .

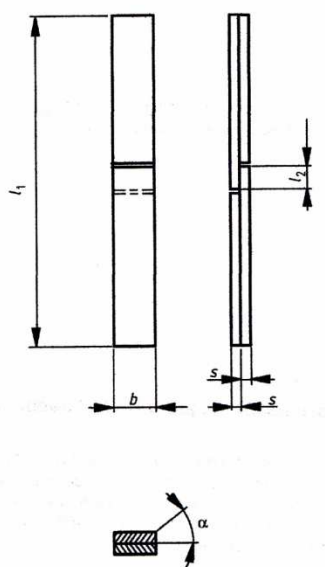
Desky se řezou příčně ke směru vláken na délku nejméně 300 mm se zřetelem na prořez a podélně s vlákny na šířku nejméně 130 mm při zohlednění prořezu. Pro zkoušky slepu s tenkou vrstvou lepidla (0,1 mm) se použijí dvě desky o tloušťce $(5,0 \pm 0,1) \text{ mm}$. Pro zkoušky slepu se silnější vrstvou lepidla $(1,0 \pm 0,1) \text{ mm}$ se použije jedna $(6,0 \pm 0,1) \text{ mm}$ silná deska a jedna $(5,0 \pm 0,1) \text{ mm}$ silná deska.

Pro *tenké vrstvy lepidla* se slepí dvě desky o tloušťce 5 mm a působením lisovacího tlaku se slepí na panel o tloušťce 10 mm.

Pro *silné vrstvy lepidla* se lepidlo vlije do vyfrézovaných drážek desky v takovém množství, aby při působení lisovacího tlaku bylo vytlačováno. Pro takové slepení se použije jedna vyfrézovaná deska a druhá nevyfrézovaná. Výsledný panel je tloušťky 11 mm.

Po slepení a vylisování se před hodnocením panely kondicionují nejméně 7 dní ve standardním prostředí $[20^\circ\text{C}/65\%]$. Zkušební tělesa se mohou řezat nejdříve 3 dny po slepení.

Počet těles musí být takový, aby se získalo minimálně 10 platných výsledků z každé expozice. Exponují se již rozřezaná zkušební tělesa. Ta musí být uložena vodorovně s volným přístupem k vodě ze všech stran a musí být podepřena tak, aby na ně nepůsobilo žádné napětí. Jednotlivé expozice jsou vyznačeny v tabulce č. 16 [5].



Legenda:

l_1 celková délka zkušebního tělesa

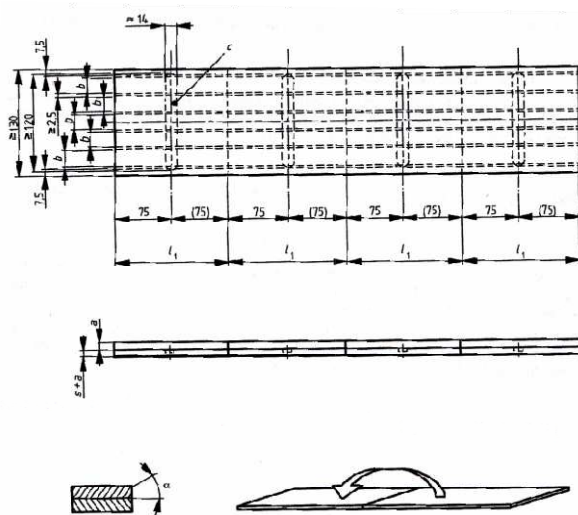
l_2 délka přelepu

b šířka zkušebního tělesa

s tloušťka adherendu

α úhel mezi letokruhy a lepenými plochami

Obr. č. 10: Přeplátování zkušebních těles s danou vrstvou lepidla



Legenda:

l_1 = délka zkušební tělesa

a = tloušťka silné vrstvy lepidla

b = šířka zkušební tělesa

c = drážky pro silnou vrstvu lepidla

α = úhel mezi letokruhy a lepenými plochami

s = tloušťka desek pro silnou vrstvu lepidla

Obr. č. 11: Příklad slepeného panelu pro řezání na jednotlivá zkušební tělesa (rozměry v milimetrech)

4.1.4. Postup zkoušky

Zkušební těleso se upevní symetricky do čelistí zkušebního zařízení tak, aby vzdálenost mezi čelistmi byla od 50 mm do 90 mm. Zkušební těleso se pevně uchytlí, aby jeho podélná osa byla paralelní se směrem zatěžování. Působí se tahovou silou, dokud se těleso neporuší.

Pro porovnávací zkoušky lepidel a zařazení lepidla do typu I nebo II podle EN 301 se zkouška provede buď:

a) s přírůstkem zatěžování ($2,0 \pm 0,5$) kN/min; nebo

b) s konstantní rychlostí posuvu čelisti nepřesahující 5mm/min tak, aby doba potřebná k porušení byla mezi 30 s a 90 s.

Zaznamená se zatížení při porušení. Pro každé zkušební těleso se vizuálně odhadne a zaznamená procentuální podíl porušení dřeva, s přesností na nejbližších 10%.

4.1.4.1. Vyjádření výsledků

Smyková pevnost každého zkušební tělesa se vypočítá podle vzorce:

$$\text{Smyková pevnost} = \frac{\text{Zatížení při porušení [N]}}{200} \frac{[\text{N}]}{[\text{mm}^2]}$$

Jako výsledek zkoušky se uvádí průměr smykové pevnosti [N/mm²] vypočítaný z 10 platných zkoušek. Porušení dřeva se vyjádří jako průměr z 10 platných výsledků zkoušek [5].

5. Hygrotermální namáhání

Životnost lepeného spoje u dřevěných prvků, resp. snížení pevnostních charakteristik spoje, je ovlivněna zejména příčinami, jako je únavové poškození (expozice cyklickému zatížení), vliv vnějších podmínek (teplota, vlhkost), vliv objemových změn dřevěného adherendu a kríčovým chováním lepidla při zvýšeném působení napětí, teploty a vlhkosti. Na základě mnoha experimentů byly sestaveny různé modely určující životnost lepených spojů při jejich vystavení cyklické únavě nebo venkovnímu prostředí, které mají rozdílnou vypovídající schopností [7].

5.1. Teplotní namáhání

Modelování každého procesu degradace vyžaduje informace o změně vlastností materiálu s časem a rychlostí změny těchto vlastností porovnávanou k hodnotám degračních činitelů. Změna vlastností s časem může mít jednu z mnoha forem (např. lineární nebo logaritmická). Jako jeden z prvních přístupů můžeme vzít v případě modelování degradace materiálu vlivem teploty v potaz Arrheniův vztah. Podle Arrheniova zákona rychlost chemické reakce (vyjádřené rychlostním koeficientem k) závisící na teplotě lze vyjádřit takto [9, 10]:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad [1]$$

kde k rychlostní koeficient reakce,
 A konstanta (frekvenční faktor),
 E_a aktivační energie,
 R univerzální plynová konstanta,
 T termodynamická teplota.

Aktivační energie E_a hraje klíčovou roli při určování rychlosti degradace a její hodnota závisí na mechanismu selhání materiálů. Konstanty k se většinou získávají experimentálním měřením.

Za předpokladu zachování chemického řádu a s ohledem na časové hledisko (např. t^n) lze změnu materiálové charakteristiky P vyjádřit vztahem:

$$P = P_0 \cdot t^n \cdot e^{-\frac{E_a}{T}} \quad [2]$$

kde n konstanta,
 P_0 materiálová charakteristika při referenční teplotě T_0

5.2. Teplotně-vlhkostní namáhání

5.2.1. Parametrické přístupy

Teplotně-vlhkostní efekt je proces způsobený kombinací působící vlhkosti a teploty. Vlastnosti degradovaného lepidla lze díky teplotně vlhkostním účinkům často aproximovat pomocí jednoduchého algebraického vztahu níže uvedeného [11]:

$$\frac{P}{P_0} = \sqrt{\frac{T_{GW}-T}{T_{GD}-T_0}} \quad [3]$$

kde P materiálová charakteristika (obvykle pevnost),
 T_{GD} a T_{GW} teploty skelného přechodu, suchý (T_{GD}) a kondiciovaný (T_{GW}) materiál.

T_{GW} mohou být vyjádřeny v podmínkách T_{GD} následovně [12]:

$$T_{GW} = AM^2 + BM + C.T_{GD} \quad [4]$$

kde M hmotnostní vlhkost v lepidle,
 A , B a C konstanty získané z experimentálně zjištěných hodnot.

Teplota skelného přechodu může být měřeno za použití buď dynamická mechanická termální analýzy DMTA (dynamicko mechanická termální analýza) nebo DSC analýzou. Chamis a Murthy [10] předpokládají pro systémy na bázi termosetů, že konstanty A , B a C nabývají hodnoty 0,005, -0,1 a 1,0. Ve skutečnosti lze pro tyto konstanty očekávat, že se liší pro různé systémy lepidel a druhy mechanických vlastností, a proto musejí být určeny pro každý specifický případ. Autoři [12] rozšířili rovnici (3) tak, aby obsahovala i degradaci během cyklického zatěžování následovně dle (5). Hodnota konstanty A se bude pohybovat dle typu lepidla a mechanické vlastnosti, přesto je pro teplotně-vlhkostní prostředí doporučená hodnota 0,1.

$$\frac{P}{P_0} = \sqrt{\left(\frac{T_{GW}-T}{T_{GD}-T_0}\right)^{1/2}} - A \cdot \log N \quad [5]$$

kde A konstanta získaná z experimentálně zjištěných hodnot,
 N počet cyklů.

5.2.2. Model zrychleného stárnutí

Přirozený proces vlhkostní absorpce pro většinu polymerních materiálů je obvykle pomalý. Je proto velmi obtížné dosáhnout podmínky nasycení, nebo dokonce reálnou úroveň vlhkosti v určitém časovém období. V literatuře [11] autoři předpokládají hypotézu, že nárůst teploty v průběhu experimentu (odpovídající změně teploty skelného přechodu δT_G (např. $T_{GD} - T_{GW}$))

vlivem teplotně-vlhkostní expozice může být použit k zobrazení míry degradace polymeru vlhkostním namáháním. Tento přístup je odvislý na skutečnosti, že typ porušení při teplotně-vlhkostních podmínkách je nahrazen prostředím vyšší teploty bez vlhkosti. Tento postup je velmi zjednodušený, přesto zaručuje velkou pozornost ve vztahu k chování lepeného spoje.

Alternativním přístupem je experimentální ověření materiálových vlastností při zvolené teplotně-vlhkostní expozici. Data jsou často reprezentována následující rovnicí [15].

$$\mathbf{LogA = A_1 + B_1 \cdot t} \quad [6]$$

kde A materiálová vlastnost (např. pevnost ve smyku),
 A₁ materiálová vlastnost na začátku procesu stárnutí,
 B₁ míra degradace,
 t doba stárnutí.

Podobné hodnoty jsou určeny při různých teplotách. Poté se vypočítá pro každou teplotní expozici doba potřebná ke snížení původní síly na poloviční původní hodnotu (poloviční životnost). Dalším krokem je poté vykreslení závislosti „polovičních“ vlastností jako funkci vzájemné expoziční teploty (1/T). V podstatě se jedná o Arrhéniov vztah teplotní závislosti, který může být reprezentován následující rovnicí [15]:

$$\mathbf{Log t_{1/2} = A_2 + \frac{B_2}{T}} \quad [7]$$

kde t_{1/2} poloviční vlastnost (např. pevnost ve smyku),
 A₂ a B₂ materiálové konstanty,
 T teplota při stárnutí.

Životnost (nebo poloviční životnost) lze odhadnout extrapolací z grafu závislosti na hodnotě 1/T nebo z uvedené rovnice (7).

Řada faktorů může způsobit potíže při interpretaci výsledků měření vlastností v závislosti na čase. Patří mezi ně:

- 1) Síla spojů se může zvýšit nebo snížit po počáteční expozici zvýšenou teplotou. To může být následek ztráty těkavých látek, chemického zesíťování nebo snížení vnitřních napětí.
- 2) Míra dlouhodobé degradace se může měnit v průběhu stárnutí. Proces stárnutí se může také měnit s teplotou a časem expozice.

- 3) Statistická variabilita, která se obvykle zvyšuje s časem expozice, může vnést odlišný efekty, které ztěžují rozlišit účinky klíčových proměnných a určit posloupnost stárnutí. Přesné statistické analýzy je nutné stanovit precizně (intervaly spolehlivosti) pro výsledky trvanlivosti.

6. Cíl práce

Lepené spoje a lepené dřevěné prvky nacházejí stále větší uplatnění ve stavební praxi zejména díky objemově stálému chování v porovnání s rostlým dřevem, u některých speciálních aplikací se dokonce stávají jedinou možnou volbou. S rostoucím počtem těchto lepených prvků je však nutné porovnat deterministické výpočty životnosti ke skutečným, experimentálně zjištěným výsledkům. Skutečné chování lepených dřevěných prvků při vystavení rozdílným charakteristikám může být rozdílné od těchto výpočtových modelů, a normativní postupy nemusejí být zárukou chování lepené spáry např. při cyklicky se měnícím vlhkostním namáhání. Z tohoto účelu je cílem následující:

- a) výběr vhodných druhů lepidel a určení jejich trvanlivosti,
- b) popsání vybraných modifikací primeru,
- c) použití metody hloubky proniku dle EPI-fluorescenčního mikroskopu.

Výsledkem práce by rovněž mělo být sestavení vhodné metodiky pro určování kvality lepených spar. I přesto, že bylo uvažováno s MUF, PRF, a dalšími běžně užívanými lepidly, vzhledem k rozsahu práce bylo přistoupeno pouze k výběru epoxidových lepidel. Hlavním důvodem užití epoxidových lepidel je ta skutečnost, že v současnosti není jejich trvanlivost zřejmá, neboť existují protichůdné výsledky ohledně možnosti jejich využití pro dřevěné adherendy. Zejména při cyklickém hygrotermálním namáhání a objemových změn dřeva je epoxid velmi křehký, a je třeba zajistit jeho větší stabilitu (zvýšit jeho duktilitu).

Dalším z cílů diplomové práce bude na epoxidovém lepidle provést základní hodnocení dle normativních požadavků, tj. zatřídění typu lepidla I, II dle minimálních hodnot smykových pevností dané EN 301. Bude ověřeno, zda tato lepidla splňují či nesplňují dané normativní požadavky. V neposlední řadě bude kladen důraz na ověření různých modifikací epoxidového lepidla. Modifikace pomocí CB (*carbon black*), tzn. uhlíkových sazí pak bude probíhat ve dvou variantách, a to dávkování ve velikosti částic v mikrometrech a nanometrech.

7. Popis experimentu

7.1. Dřevina

Za dřevo pro tento experiment bylo zvoleno dřevo smrkové, které se řadí dle tvrdosti do skupin měkkých až velmi měkkých dřevin, které však i přesto vykazuje poměrně dostačující pevnost a pružnost pro využití ve stavebnictví. Z hlediska trvanlivosti lze smrkové dřevo zařadit za dřevo málo trvanlivé vůči působení dřevokazným houbám, dle EN 350-1 specifikovanou třídou 4. Tato dřevina patří k nejdostupnějším a široce používaným v celé škále odvětví jako jsou stavebnictví, truhlářství, výroba papíru, dřevité vlny či k výrobě hudebních nástrojů. Specifické charakteristiky smrkového dřeva jsou uvedeny v tabulce:[17]

Tab. č. 9: Vlastnosti smrkového dřeva

Vlastnosti	Rozsah	jednotka
Objemová hmotnost	392	kg/m ³
Pevnost v ohybu f_m	70,4	N/mm ²
Pevnost v tlaku	34,1	
Pevnost v tahu	74,4	
Modul pružnosti v tahu	14956	
Tvrdość dle Brinella $H_B^{(*)}$	28-32	-

(Hodnoty v tabulce jsou orientační, brány jako průměr z daného množství měření určitých vlastností smrkového dřeva)

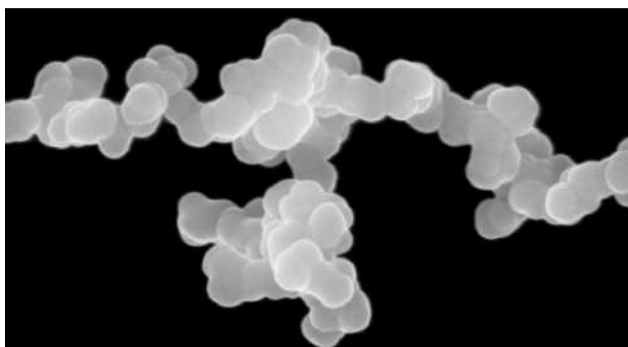
7.2. Uhlíkové saze

Uhlíkové saze jsou chemicky a fyzikálně definované produkty získané v kontrolovaných podmínkách. Pokud nejsou zpracovány oxidačně, tak se skládají z více než 96% čistých uhlíkových částic a nepatrném množství kyslíku, vodíku, dusíku a síry. Zanedbatelné je pak množství organických látek na povrchu sazí (většinou méně než 0,1%), mohou být extrahovány za použití toluenu. Koncentrace kovů jsou také zanedbatelné. Primární částice uhlíku se vyskytují v rozmezí od 10 nm do cca. 500 nm. Saze zpracovány oxidačně se liší od těch, které nejsou v tom, že mohou obsahovat až 15 % kyslíku.

Saze (komínové saze a výfukové saze), jsou naproti tomu produkty nekontrolovaného spalování uhlovodíků. Získání přesných údajů o složení sazí je prakticky nemožné, protože podmínky, za kterých byly vytvořeny, kolísají. Dále je vyloučena soudržnost, pokud jde o kvalitu a vlastnosti. Nicméně, saze mohou být odlišeny od sazí uhlíkových dle anorganického a organického obsahu nečistot. Komínové saze, například mohou mít obsah uhlíku menší než 50% a obsahem popela více než 20% [18].

Tab. č. 10: Chemické složení neošetřených sazí (přibližné hodnoty)

Prvek	obsah
Uhlík	96-99,5
Vodík	0,2-1,3
Kyslík	0,2-0,5
Dusík	0-0,7
Síra	0,1-1,0
Zbytkový popel	< 1



Obr. č. 12: Obrázek pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Pohled na uhlíkovou sazi sestávající z tavených primárních částic (zvětšení = 120.000 x)

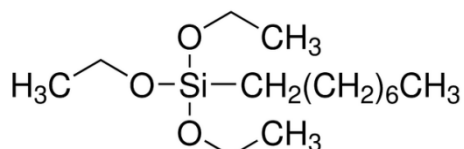
Základní surovina pro výrobu uhlíkových sazí se skládá z uhlovodíku, které jsou rozděleny do jejich základních prvků, uhlík a vodík. Výroba probíhá tepelně nebo tepelně-oxidačním způsobem (částečné spalování). Z ekonomické stránky je tepelně oxidační proces převládající. Saze lze tedy považovat za velmi neuspořádanou formu grafitového uhlíku. Je to ohříváním látky na 3000°C, za inertních podmínek, které se vyvíjí v uspořádané grafitické formace. Kromě uhlíku elementární analýza normálních uhlíkových sazí také poskytuje nepatrné množství kyslíku, vodíku, dusíku a síry. Většina z těchto prvků je soustředěna na povrchu uhlíkových sazí. Odstranění stop organických prvků je možné s použitím speciálních rozpouštědel. Extrahování uhlíkových sazí je založené na toluenu, extrakt toluenu, má za následek hodnoty většinou menší než 0,1% [18].

Hustota se v závislosti na použité metodě může lišit a to v rozmezí od 1,7 do 1,9 g/cm³. Elektrická vodivost se obvykle neměří v sazi samotné, ale ve sloučenině obsahující saze, to znamená s polymerem či vazebným činidlem.

7.3. Silanové aditivum (Silquest A137, MomentiveTM)

7.3.1. Charakteristika aditiva

Silquest A-137 je monomerní alkyalkoxysilane určený především k ochraně povrchu betonu zdiva a dalších materiálů vystavených působení vlhkosti. Jedná se o n-oktyltriethoxysilan s vysokým hydrofobním účinkem [28].



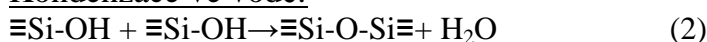
Obr. č. 13: Konstituční vzorec oktyltriethoxysilanu [29]

Silany jsou nestabilní ve vodě a hydrolyzují na silanoláty, které dále za přítomnosti molekul vody nebo alkoholu kondenzují do třírozměrných struktur, dle následujících rovnic:

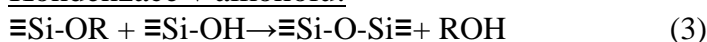
Hydrolyza:



Kondenzace ve vodě:



Kondenzace v alkoholu:



R představuje alkylovou skupinu ve formě $\text{C}_x\text{H}_{2x+1}$ [30].

7.3.1. Důvody využití Silquestu

Oktytriethoxysilan byl úspěšně použit jako biocidní impregnační látka k hydrofobizaci povrchu vzorků dřeva. Kontaktní úhel kapky vody dosáhl hodnoty 135° [30]. Dřevo spojované epoxidovým adhezivem dosahuje vysokých hodnot pevností, není-li kompozit vystaven vlhkosti. Při přístupu vlhkosti dochází k delaminaci spoje v důsledku různých objemových změn adhezivu a lepidla a vzniku napětí na styku těchto dvou látek [31]. Hydrofobizace lepené spáry pomocí aditiva Silquest A-137 by měla zamezit přístupu vlhkosti a tím snížit hodnoty rozměrového rozpínání a smršťování dřeva i lepidla. Omezení namáhání lepené spáry objemovými změnami složek kompozitu by pak mělo vést ke zvýšení trvanlivosti lepeného spoje při vystavení vlivu vlhkosti.

7.4. Epoxidový prumer CHS 474/TELALIT 0492

7.4.1. Nemodifikovaný prumer

7.4.1.1. Charakteristika

Epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 474 (Spolechemie, s.r.o. s odpovídajícím tvrdidlem TELALIT 0492 byla navržena k použití. Jedná se o dvousložkový nízkoviskózní epoxidový systém pro zpracování při normální nebo zvýšené teplotě. Před vlastním zpracováním se CHS EPOXY 474 (složka A) smísí s tvrdidlem TELALIT 0492 (složka B) v předepsaném míšicím poměru 100:23.[20]

7.4.1.2. Vlastnosti složek systému

Základní charakteristiky jednotlivých složek epoxidové ho systému jsou uvedeny v tab. č. 11. Parametry výsledného vytvrzeného kompozitu jsou uvedeny v tab. č. 12.[20]

Tab. č. 11: Bližší vlastnosti daných složek systému

SLOŽKA A (CHS-EPOXY 474)	hodnota	jednotka
Viskozita při 25 °C	300 - 600	mPa. s
Epoxidový hmotnostní ekvivalent	204 - 223	g/mol
Barva	max. 100	j. Hazena
Epoxidový index	4,5 - 4,9	mol/kg
SLOŽKA B (TELALIT 0492)	hodnota	jednotka
Viskozita při 25 °C	15 - 30	mPa. s
Aminové číslo	550 - 600	mg KOH/g
Barva	max. 3	st. Gardnera
Hustota při 23 °C	0,93 - 0,96	g/cm ³

Tab. č. 12: Základní vlastnosti vytvrzené směsi

Pevnost v tahu	59,2	MPa
Pevnost v tlaku	71,2	MPa
Nasákavost za 7 dní/23 °C	0,33	%
Přilnavost	6,5	MPa
Lineární smrštění při vytvrzování za 14 dní	0,42	%

7.4.2. Modifikace primeru pomocí plniva uhlíkových sazí (nevztužující charakter)

V tomto případě byly uhlíkové saze přimíchány s tvrdidlem do lepidla bez jakékoli úpravy uhlíkových sazí. Použité množství uhlíkových sazí bylo zvoleno v následujícím množství, jednalo se o plnění 1,0; 3,0; 5,0 a 10,0 hm. %.

7.4.3. Modifikace primeru pomocí plniva uhlíkových sazí (vztužující charakter)

Dispergace uhlíkových sazí pro dosažení velikosti části v nano velikosti probíhalo pomocí ultrazvukového přístroje SONOPULS fy. Bandelin. Deaglomerování uhlíkových sazí bylo provedeno ve skleněné rozetě pracující na kavitačním procesu suspenze. V první fázi přípravy byla připravena suspenze z roztoku chloroformu a příslušného množství uhlíkových sazí, které byly zahřány na teplotu 45°C. Magnetickou tyčinkou po dobu 10 minut bylo plnivo v epoxidovém lepidle rozmícháno. Takto připravená suspenze poté byla aplikována do skleněné rozety, a poté vystaveny ultrazvuku po dobu 6 minut při 75% amplitudě. Poté byla takto dispergovaná směs vystavena po dobu 12 hodin vakuu pro vypaření těkavého chloroformu ze směsi. Poté již byla ke směsi přidána příslušný poměr tvrdidla a s takto připravenou směsí byla aplikována na povrch dřevěných desek. Nános na obě plochy byl proveden v množství 150 g/m².



Obr. č. 14: Ultrazvukový přístroj SONOPULS



Obr. č. 15: Speciální nádobka na dispergaci uhlíkových částic pomocí ultrazvuku

7.5. Epoxidové lepidlo CHS-EPOXY 531

7.5.1. Charakteristika

Nízkomolekulární epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 531 je na bázi Bisfenolu a modifikovaná reaktivním rozpouštědlem. Tato epoxidová pryskyřice je navržena k použití jako dvousložkový epoxy systém pro zpracování při normální či zvýšené teplotě. Při mísení složek musí být dodržet mísící poměr pro určitý typ tvrdidla udávaný výrobcem spolu s časem potřebným pro správné promísení, který se pohybuje v rozmezí 2- 3 minut. Dále je nutné připravit si množství, které jsme schopni zpracovat vzhledem k délce zpracovatelnosti materiálu. Před vlastním zpracováním se CHS EPOXY 531 (složka A) smísí s tvrdidlem TELALIT 0492 (složka B) v mísícím poměru 100:27.[21]

7.5.2. Vlastnosti epoxidového lepidla CHS-EPOXY 531

Tab. č. 13: Bližší vlastnosti složek systému

SLOŽKA A (CHS-EPOXY 531)	hodnota	jednotka
Viskozita při 25 °C	1,5 – 2,3	Pa . s
Epoxidový hmotnostní ekvivalent	175 - 182	g/mol
Barva	max. 100	j. Hazena
Epoxidový index	5,5 – 5,7	eg/kg
Volný epichlorhydrin	max. 10	ppm
SLOŽKA B (TELALIT 0492)	hodnota	jendotka
Viskozita při 25 °C	15 - 30	mPa. s
Aminové číslo	550 - 600	mg KOH/g
Barva	max. 3	st. Gardnera
Hustota při 23 °C	0,93 - 0,96	g/cm ³

7.5.3. Základní parametry vytvrzené směsi (CHS-EPOXY 531 a TELALIT 0492)

Tab. č. 14: Základní vlastnosti vytvrzené směsi

Pevnost v tahu	58,4	MPa
Pevnost v tlaku	116,04	MPa
Nasákavost za 7 dní/23 °C	0,2	%
Přilnavost	5,93	MPa
Lineární smrštění při vytvrzování za 14 dní	0,1	%

7.6. Výroba zkušebních těles

7.6.1. Předpříprava povrchu

Ne více než 24 hodin před lepením jsme plochy určené pro lepení lehce zbrousili (plochy se mohou také lehce ohoblovat). Použili jsme brusný papír stupně P 100 a odpad po broušení jsme pečlivě odstranili. Takto připravené plochy nesmí být zašpiněny.

U všech zkušebních těles byla provedena příprava povrchu nátěrem pomocí silanového činidla (Silquest A 137 fy. Momentive).

Výroba probíhala smícháním vody s Iso propyl alkoholem v poměru 1:10 u kterého bylo posléze změřeno pH. Směs by měla být více kyselá, proto je snaha ji okyselit tak, aby výsledné pH bylo kolem hodnoty 5,0. Okyselování probíhalo pomocí CH₃COOH v množství pár mililitrů.

7.6.2. Aplikace primeru

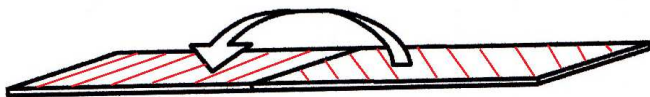
Pro účely experimentu byly navrženy tyto zkušební sady těles, které jsou specifikovány v následující tabulce.

Tab. č. 15 : *upřesnění sad vzorků s dávkováním MCB a NCB*

číslo	Druh lepidla a primeru	Množství MCB, NCB[%]
1	Epoxidový primer (474+0492)	-
2	Modifikovaný epoxidový primer plněn MCB	(1 – 3 – 5 – 10)
3	Modifikovaný epoxidový primer plněn NCB	(0,5 – 1 – 2 – 3)

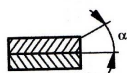
7.6.3. Lepení desek

Zkušební tělesa jsme připravili pomocí dvou desek o dl. 2,0 m tl. 25 mm, ohoblovaného smrkového dřeva s hustotou $442 \pm 45 \text{ kg/m}^3$ při vlhkosti dřeva cca 9,2 %. Nános lepidla byl proveden na celou délku připravené desky, která byla poté rozdělena a slepena k sobě navzájem, čímž vznikl slepenec o dl. 1,0 m. Takto provedený slepenec byl následně lisován za studena tlakem 1,0 MPa po dobu minimálně 16 hodin pro dostatečné vytvrzení. Při vytahování vytvrzených vzorků z lisu jsme následně odstranili zatvrdlé přetoky. Z takto připravených slepenců byly následně naformátovány kotoučové pile zkušební vzorky pro zkoušku smykových pevností.[5]



Obr. č. 16: systém překlopení desek při lepení

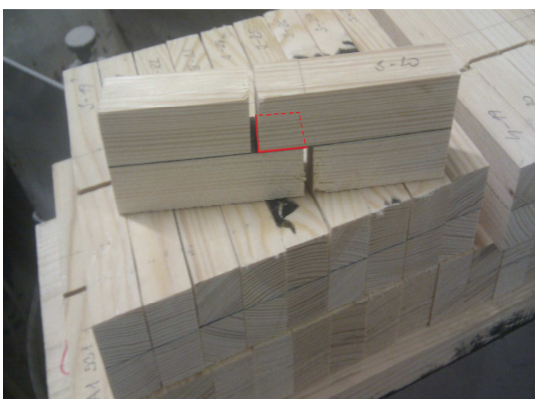
Všechny desky použité pro stejné cyklické namáhání (včetně rozdílných tloušťek vrstev lepidla) byly připraveny ze stejného řeziva. Úhel mezi letokruhy a lepenými plochami splňoval požadavek normy specifikovaný dle obrázku 30° až 90°.



Obr. č. 17: Znárodnění úhlu mezi lepenou plochou a letokruhy

7.6.4. Příprava zkušebních vzorků dle normy ČSN EN 302 - 1

Vzorky byly nařezány do úrovně lepené spáry pomocí kotoučové pily tak, aby nedošlo k prořezu přes lepenou spáru popřípadě, aby nedošlo k nedořezání k úrovni lepené spáry. Zkušební vzorky byly naříznuty tak, aby smyková plocha byla cca 400 mm² (20 x 20 mm), tato smyková plocha je znázorněna červenou barvou na obrázku 18. Desky byly nařezány příčně ke směru vláken na délku nejméně 300 mm se zřetelem na prořez a podélně s vlákny na šířku nejméně 130 mm při zohlednění prořezu [5]. Dostatečný počet zkušebních těles byl zvolen s ohledem na normový požadavek ČSN EN 302-1, aby se získalo nejméně 10 platných výsledků pro každý typ expozice A1, A4 a A5.



Obr. č. 18: Znárodnění prořezu vzorků do lepené spáry se zvýrazněnou smykovou plochou

7.7. Exponování zkušebních těles

Všechny zkušební vzorky před samotnou expozicí (A1, A4 nebo A5) byly kondicionovány v laboratorních podmínkách dle normy ČSN EN 302-1. Po slepení a

vylišování a před hodnocením se panely kondicionují nejméně 7 dní ve standardním prostředí, kdy teplota se musí pohybovat v rozmezí $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost musí být v rozmezí $(65 \pm 5) \%$. Zkušební tělesa se pak dále mohou řezat nejdříve 3 dny po slepení, doba kondicionování se může prodloužit či zkrátit, pokud to doporučuje výrobce lepidla.

V tomto experimentu byly zvoleny expozice A1, A4 a A5. Expozice A1 by měla sloužit pro porovnání s prostředím, kdy lepený prvek nepřijde do kontaktu s vlhkostí ani vodou. Další dvě následující expozice A4 a A5 jsou pak ponořeny ve vařící vodě po dobu 6 hodin, s následným 2 hodinovým chlazením ve vodě o teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Rozdíl mezi těmito dvěma expozicemi je v tom, že A4 se zkouší v mokřém stavu, zatímco po expozici A5 jsou vzorky zpět kondicionovány ve standardním prostředí do dosažení původní hmotnosti. Tedy zkouší se ve stavu suchém. Ve vodní lázni musí být tělesa uložena vodorovně s volným přístupem k vodě ze všech stran a musí být podepřena tak, aby na ně nepůsobilo žádné napětí [5].

Tab. č. 16: Popis expozic vzorků dle podmínek uvedených v tabulce

Označení	Expozice
A1	7 dní ve standardním prostředí.
A2	4 dny ponoření ve vodě při $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$; zkouší se v mokřém stavu;
A3	4 dny ponoření ve vodě při $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$; opětné kondicionování ve standardním prostředí [20/65] do dosažení původní hmotnosti; zkouší se v suchém stavu;
A4	6 hodin ponoření ve vařící vodě; 2 hodiny ponoření ve vodě při $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$; zkouší se v mokřém stavu;
A5	6 hodin ponoření ve vařící vodě; 2 hodiny ponoření ve vodě při $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$; opětné kondicionování ve standardním prostředí [20°/65%] do dosažení původní hmotnosti; zkouší se v suchém stavu;

7.8. Zkoušení vzorků

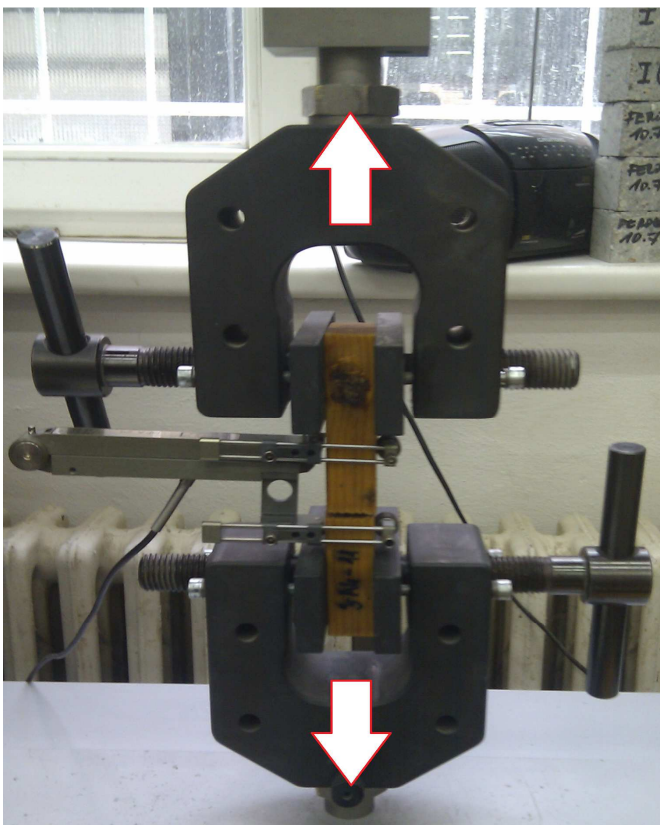
7.8.1. Zkoušení smykových pevností

Výsledky zkoušek, při nichž došlo k porušení dřeva ve větší míře než k porušení lepidla při hodnotách pod daným minimem, nebo když je patrné špatné nanesení lepidla, bylo neplatné. Do celkového průměru hodnot však musíme připočítat i hodnoty nulové. Při samovolném porušení vzorku při formátování na kotoučové pile se nulové výsledky nezapočítávají. Podélné smykové pevnosti slepených spojů na přeplátovaných zkušebních tělesech jsme zkoušeli pomocí přístroje Testometric M350-20CT. Zkušební zařízení musí pracovat při konstantní rychlosti zatěžování ($2,0 \pm 0,5$) kN/min, nebo konstantní rychlostí posuvu čelistí nepřesahující 5 mm/min tak, aby doba potřebná k porušení byla mezi 30 a 90 s. Maximální zatížení při porušení pak zaznamenáme [5].



Obr. č. 19: Tahový lis Testometric s čelistmi pro uchycení vzorku se zaznamenávacím zařízením pro vyhodnocení výsledků a tenzometrem.

Vzorky byly umístěny symetricky do čelistí zkušebního zařízení Testometric tak, aby vzdálenost mezi čelistmi byla v rozmezí od 50 mm do 90 mm. Zkušební tělesa byla pevně uchycena, aby jejich podélná osa byla paralelní se směrem zatěžování. Dále pak tahový stroj působí silou, dokud se těleso neporuší.[5]



Obr. č. 20: Detail upnutého vzorku do čelistí s tenzometrem měřícím protáhnutí vzorku do doby přerušeni v lomové spáře.

7.8.2. Typ porušení smykové plochy

Pro přesné určení způsobu porušení, zdali se jedná o ztrátu vnitřní soudržnosti stejnorodých molekul (kohezi) či různorodých molekul (adhezi), se u každého porušeného vzorku stanovuje procentuální odhad poškozené smykové plochy. Za doplňkový nástroj specifikující způsob porušení byla pak zvolena mikroskopie.

Kohezní porušení stanovujeme vždy po tahové zkoušce, kdy dojde k porušení zkušebního tělesa v lepené spáře. Kohezní poškození (tzv. *wood failure*) se odhaduje vizuálně a zaznamenává se procentuální podíl porušení dřeva s přesností na nejbližších 10 %. Jako kohezní porušení můžeme počítat to, když vzorek je porušen ve dřevní hmotě a nikoli v lepené spáře vzorku. Pokud se na smykové ploše nachází pouze vytvrzené lepidlo je kohezní porušení rovno 0 %, naopak pokud ve smykové lomové spáře není viditelná část lepidla je jeho kohezní porušení rovno 100 %. Možné příklady kohezního porušení jsou znázorněny na dvou příkladech vzorků níže.[5]



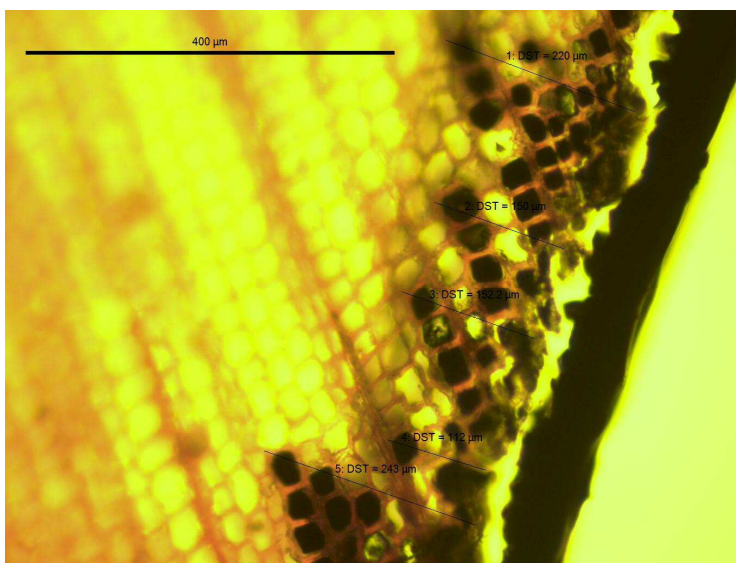
Obr. č. 21: Příklad kohezního porušení, které bylo stanoveno na 70 %.



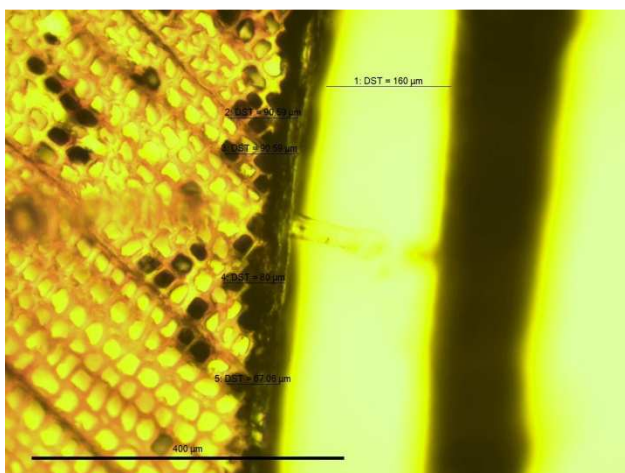
Obr. č. 22: Příklad kohezního porušení, které bylo stanoveno na 20 %, je zde viditelné pouze pár odtržených dřevních vláken

7.9. Metodika hloubky proniku

Z koncových částí lepených dřevěných spojů, byly pro každé měření hloubky penetrace vyřezány kostky o rozměrech 10 mm x 10 mm x 20 mm. Tyto kostky byly pro změkčení před testem ponořeny do horké vody. Poté byla z těchto vzorků příčným řezem pomocí rotačního mikrotomu odebrána tenká vrstva (25 μm) obsahující lepenou spáru. Takto připravené vzorky byly ponořeny do roztoku Rhodaminu B a etanolu (1 :10) po dobu jedné minuty a poté opláchnuty vodou. Mikrotomové řezy byly dále prosyceny etanolem po dobu dvou minut, aby došlo k vysušení buněčných lumenů. Pro každé měření hloubky penetrace byly použity dvě různé kostky. Pomocí fluorescenčního mikroskopu a softwaru ProgRes Jenoptik byly pořízeny 3 snímky lepeného spoje u každého vzorku. Všechny obrázky z pěti kalibrovaných měření zajistily ve výsledku celkem 30 měření maximálního proniku lepidla kolmo k lepené spáře na vzorcích, které byly pozorovány [22].



Obr. č. 23: Pohled na penetraci epoxidového lepidla při plnění 0,5% NCB



Obr. č. 24: Pohled na penetraci epoxidového lepidla při plnění 3,0% NCB

8. Výsledky zkoušek a diskuze

Výsledky smykových pevností byly tedy stanoveny pro výše uvedené lepidlo s různou modifikací primeru (MicroCB, NanoCB). Na každém zkušebním vzorku bylo pak provedeno kohezní porušení. Pokud se na zkušebním vzorku nacházel suk zasahující do zkoušené lepené spáry, bylo to zaznamenáno ve výsledcích. Veškeré výsledky smykových zkoušek jsou uvedeny v tabulkách níže. Hodnoty všech měření jsou pak v příloze.

8.1. Zkoušení smykové pevnosti a kohezního porušení ref. vzorků

8.1.1. Referenční zkušební směs 531+0492

Každá sada vzorků dle požadavků normy ČSN EN 302-1 obsahovala minimální počet zkušebních těles v počtu 10 kusů. Zkušební vzorky byly vyráběny bez jakékoli modifikace CB pro porovnání účinku plnění aditiva.

Tab. č. 17: referenční směs epoxidového lepidla 531 s primerem 0492 v expozici A1, A4 a A5

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	3,44	30	0,00	0	3,04	20
Max.	4,41	55	4,20	30	5,70	45
Prům.	3,99	42	2,55	7	4,24	32
Smodch	0,37	10,75	1,81	12,54	0,94	9,51
n	10	10	10	10	10	10
SEM	0,14	4,06	0,69	4,74	0,36	3,60

Legenda zkratk

Min. = minimální hodnota z daného počtu vzorků

Max. = maximální hodnota z daného počtu vzorků

Prům. = průměrná hodnota pevnosti či kohezního porušení ze všech měření dané sady vzorků

Smodch= směrodatná odchylka- vyjadřuje, jak se hodnoty liší od průměrné hodnoty (střední

hodnoty) a je dán vztahem $\sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n}}$

n = počet vzorků dané sady vzorků v minimálním počtu 10 kusů

SEM =Střední chyba průměru: číslo označující, jak moc se námi získaný průměr náhodného výběru liší od střední hodnoty základního souboru. Určený vztahem:

$$SEM = \frac{Smodch}{\sqrt{n}}$$

Pevnost ve smyku

Při expozici A1 vyšly referenční vzorky v porovnání s modifikací primeru pomocí MCB a NCB jako nejnižší, ne však s tak rapidními rozdíly. Při vystavení expozici A1 nebyly pozorovány výraznější rozdíly mezi referenčními vzorky a vzorky modifikovanými pomocí MCB. Při dalších expozicích A4 a A5 byl rozdíl při srovnání referenčních vzorků se vzorky modifikací pomocí MCB už byly rozdíly markantnější. V expozici A4 a A5 výsledné nízké pevnosti byly zapříčiněny použitím MCB, kde nebyly částěčky CB rozduřovány pomocí ultrazvuku. Tyto částěčky při nanášení lepidla pak tvořily shluky a nedocházelo tak ke správnému vytvrzení kompozice. Grafické zpracování rozdílných dávkování CB s danými expozicemi v závislosti na pevnostech jsou znázorněny v následujících tabulkách 1, 2, 3 a 4.

Kohezní porušení

Co se týká kohezního porušení byly výsledky v expozici A1 hodnoty nižší než při modifikaci primeru pomocí MCB. Kohezní porušení referenčních vzorků bez přístupu vlhkosti a bylo ve většině případů ve dřevní hmotě oproti plnění MCB kde docházelo k porušení téměř vždy v lepené spáře. Grafické zpracování rozdílných dávkování CB s danými expozicemi v závislosti na kohezním porušení jsou znázorněny v následujících grafech 1 až 4.

8.2. Zkoušení smykové pevnosti a kohezního porušení ref. vzorků 531+0492 s modifikovaným primerem pomocí mikro carbonblack

8.2.1. Modifikace s 1 % plnění RGB

Tab. č. 18: Výsledné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Max.	9,71	90	3,00	20	2,46	60
Prům.	6,20	47	0,72	2	1,03	10
Smodch	2,79	32,25	1,13	6,03	0,99	24,49
n	13	13	11	11	6	6
SEM	1,05	12,19	0,43	2,28	0,37	9,26

8.2.2. Modifikace s 3% plnění RGB

Tab. č. 19: Výsledné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	4,30	20	0,00	0	0,07	0
Max.	9,25	100	2,13	0	2,59	60
Prům.	6,23	76	0,80	0	1,70	5
Smodch	1,40	30,05	0,79	0,00	0,85	16,64
n	14	14	14	14	13	13
SEM	0,53	11,36	0,30	0,00	0,32	6,29

8.2.3. Modifikace s 5% plnění RGB

Tab. č. 20: Výsledné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	5,72	50	0,03	0	0,01	0
Max.	8,04	100	3,12	10	4,00	30
Prům.	6,79	82	1,46	1	2,50	7
Smodch	0,80	18,99	0,78	3,11	1,12	8,65
n	12	12	12	12	12	12
SEM	0,30	7,18	0,29	1,17	0,42	3,27

8.2.4. Modifikace s 10% plnění RGB

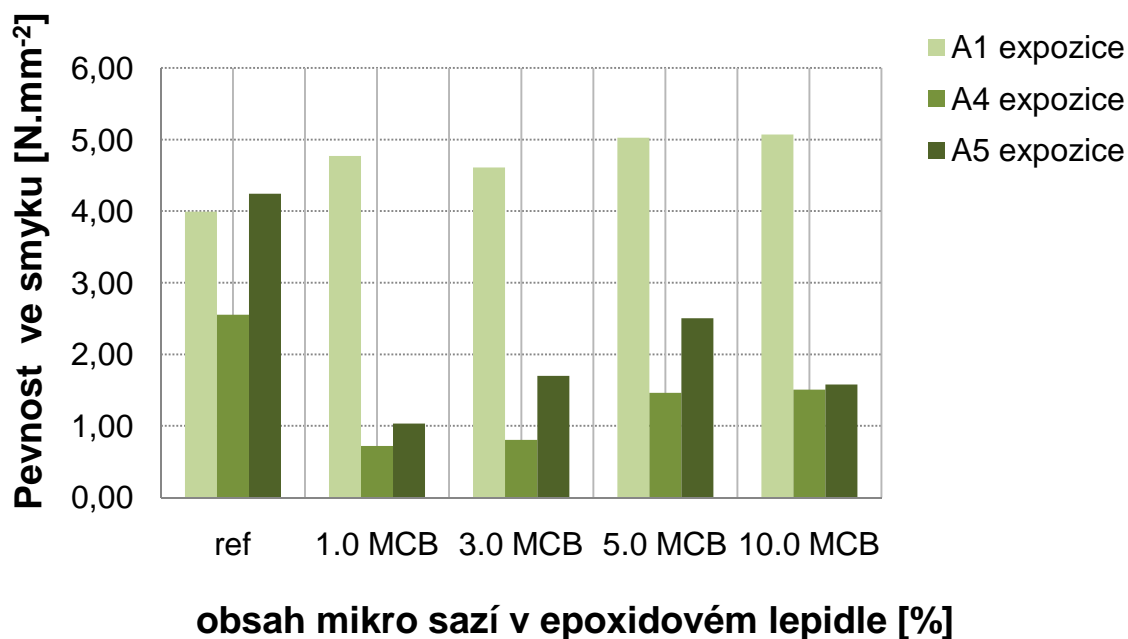
Tab. č. 21: Výsledné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	4,17	30	0,01	0	0,00	0
Max.	8,65	90	2,68	0	3,33	10
Prům.	6,84	68	1,51	0	1,58	1

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Smodch	1,40	22,61	0,82	0,00	1,26	3,11
n	12	12	11	11	12	12
SEM	0,53	8,55	0,31	0,00	0,48	1,17

Pevnost ve smyku

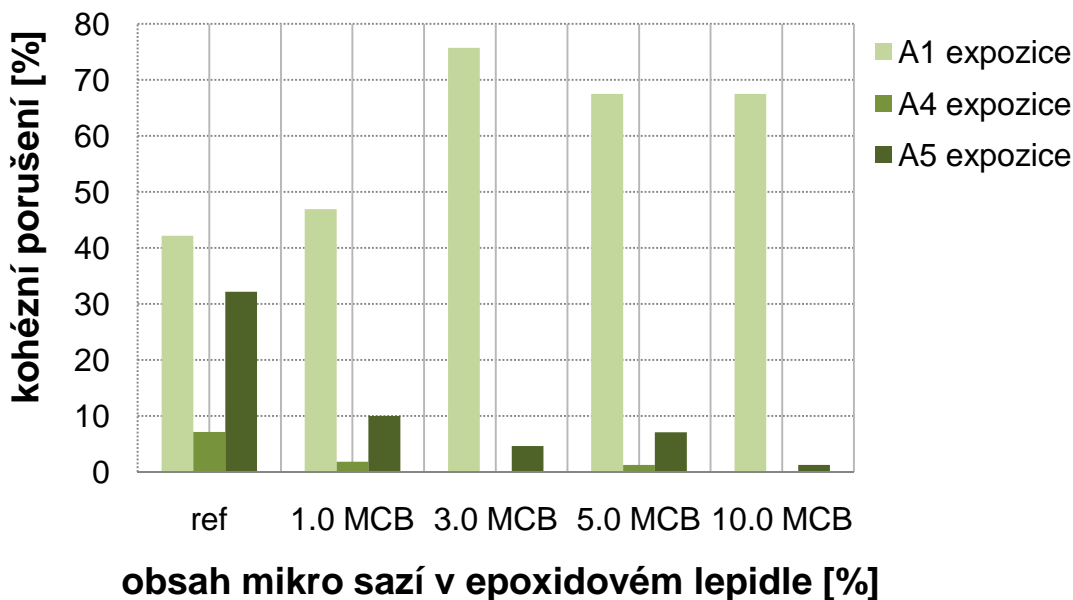
Dávkování MCB v první části experimentu bylo ve množstvích 1, 3, 5 a 10 % z hmotnostního množství lepidla. Což se po výsledných pevnostech a kohezním porušení prokázalo jako dávkování ne příliš vhodné. Díky velikosti částic nedošlo k jejich řetězení, naopak částice microCB se shlukovaly. Kvůli shlukování částic vznikalo nerovnoměrné napětí v lepené spáře, zejména při vlhkostním namáhání. U vzorků hygrotermálně namáhaných a zkoušených v mokřem stavu byla prokázána přímá úměrnost mezi stoupající pevností a množstvím MCB. Přesto se dosažené hodnoty nacházely výrazně pod přípustnou limitní hranicí minimální pevnosti.



Graf č. 1: Výsledky měření pevnosti ve smyku při daných expozicích s MCB

Kohezní porušení

Kohezní porušení lepených spár bylo v případě expozičních A4 a A5 téměř nulové, díky tomu docházelo v téměř všech případech k porušení v lepené spáře. Naproti tomu při expoziční A1 byl prokázán růstový trend s množstvím plnění. Nejlepší výsledky byly zjištěny při plnění 3 % microCB s největším kohezním porušením v průměru 76 %. Příčna adhezního porušení zkušebních vzorků v expozičních A4 a A5 je popsána výše, jedná se o rozdílné napětí na rozhraní lepidlo/dřevo v místech obsahující shluky (aglomeráty) částic a v místech s jejich absencí.



Graf č. 2: Výsledky měření kohezního porušení při daných expozičních s MCB

8.3. Zkoušení smykové pevnosti a kohezního porušení zkušebních vzorků 531+0492 s modifikovaným primerem pomocí nanocarbonblack

8.3.1. modifikace s 0,5% plnění RGB

Tab. č. 22: Výsledné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	2,74	10	3,93	50	3,08	0
Max.	5,75	100	5,56	100	5,84	100
Prům.	4,65	67	4,63	81	4,53	65
Smodch	1,07	32,25	0,59	15,98	0,86	31,44
n	10	10	8	8	12	12
SEM	0,41	12,19	0,22	6,04	0,33	11,88

8.3.2. modifikace 1% plnění RGB

Tab. č. 23: Výsledné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	4,04	5	4,07	10	1,19	0
Max.	7,99	100	5,32	100	5,05	25
Prům.	5,89	58	4,55	43	3,11	8
Smodch	1,28	43,02	0,55	32,66	1,33	8,12
n	10	10	6	6	12	12
SEM	0,48	16,26	0,21	12,34	0,50	3,07

8.3.3. modifikace 2% plnění RGB

Tab. č. 24: Výsledné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	0,00	0	0,00	0	3,15	0
Max.	7,97	85	5,71	85	5,23	100
Prům.	4,22	26	3,84	30	4,22	39
Smodch	2,26	34,35	2,00	29,95	0,67	40,69
n	9	9	11	11	7	7
SEM	0,85	12,98	0,75	11,32	0,25	15,38

8.3.4. modifikace 3% plnění RGB

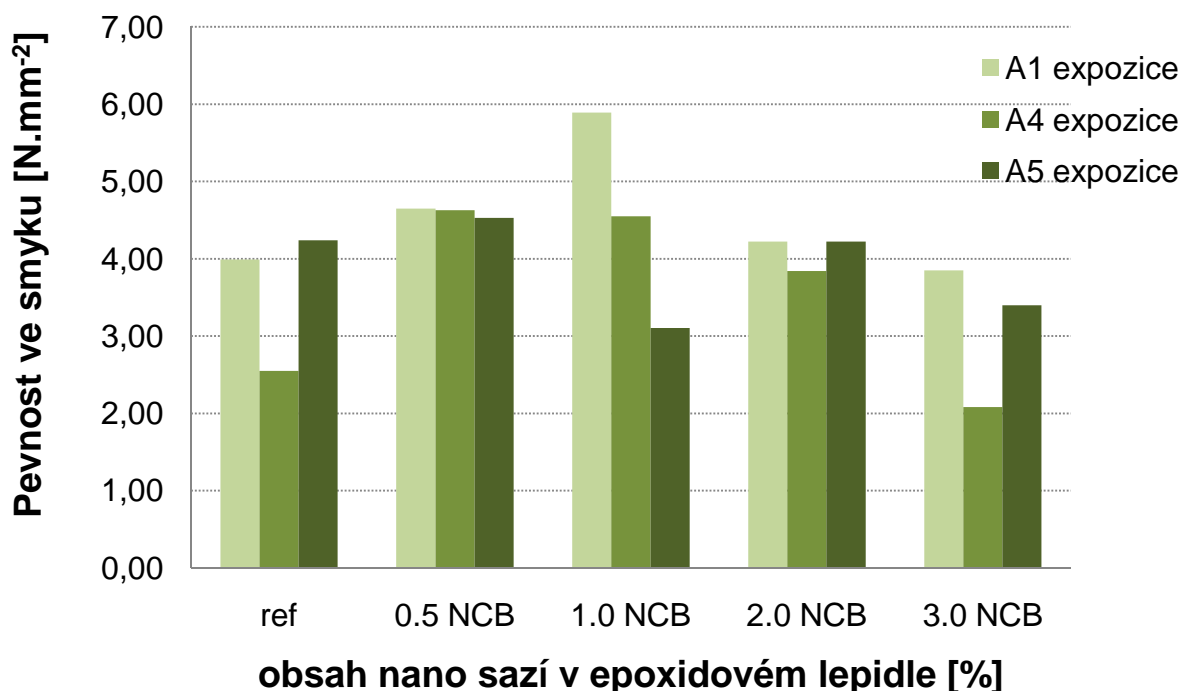
Tab. č. 25: Výsledné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Min.	0,00	0	0,00	0	0,00	0
Max.	7,74	95	3,53	100	4,81	75

Charakt.	Prostředí A1		Prostředí A4		Prostředí A5	
	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]	pevnost [MPa]	porušení [%]
Prům.	3,85	19	2,08	22	3,40	36
Smodch	2,23	37,54	1,54	35,81	1,47	30,46
n	9	9	7	7	9	9
SEM	0,84	14,19	0,58	13,53	0,56	11,51

Pevnosti ve smyku

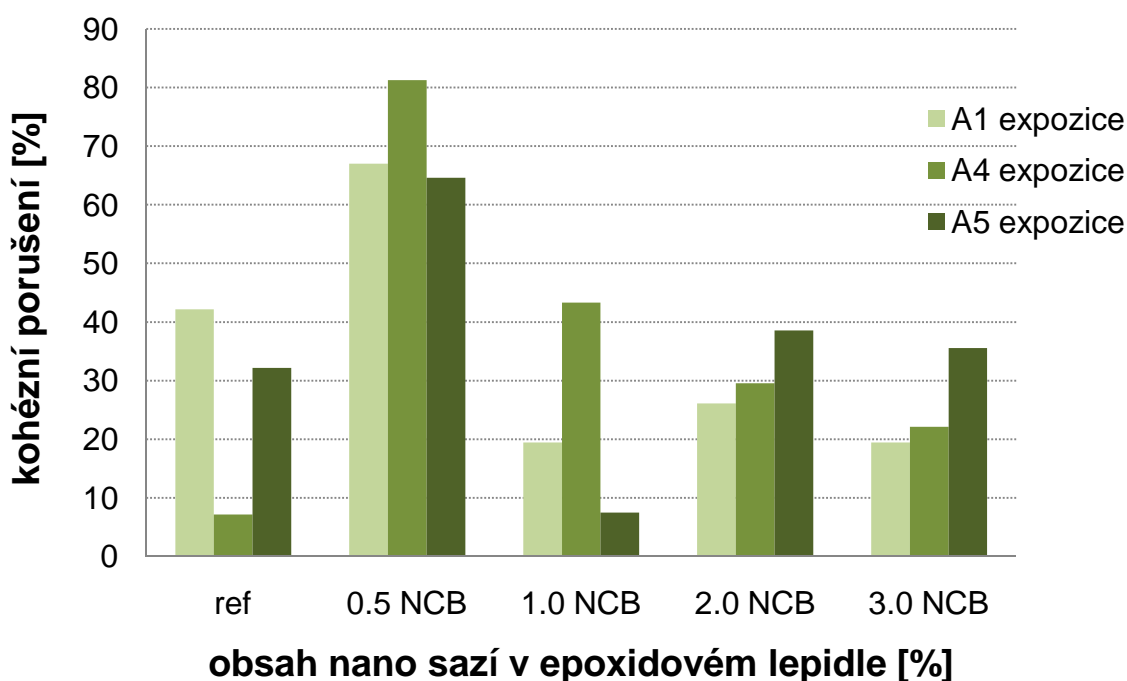
Při modifikaci primeru pomocí NCB byly výsledné pevnosti v porovnání s referenčními vzorky srovnatelné avšak při působení expozičních A4 a A5 byl prokázán kladný vliv NCB na kvalitu lepeného spoje. To bylo zapříčiněno použitím ultrazvuku k rozdužení (deaglomeraci) částic CB. Při expoziční A1 se hodnoty pevnosti ve smyku pohybovaly kolem 4,0 MPa až na plnění v množství 1 % NCB, kde byla dosažena průměrná hodnota téměř 6 MPa. Důvod rozdužení částic vedl k tomu, že částice poté daleko rovnoměrněji vyplnily epoxidovou matici, a zároveň vytvořili i síť mající částečně vyztužující charakter. Rovněž velikost částic umožnila poté lepší penetraci do dřevní struktury, čímž se vytvořil pevnější mechanický spoj mezi následnou vrstvou lepidla a strukturou dřeva.



Graf č. 3: Výsledky měření pevnosti ve smyku při daných expozičních s NCB

Kohezní porušení

Kohezním porušením lepených spar při modifikaci NCB bylo prokázáno, že dané velikosti rozdužených částic pomáhají vlastnostem lepeného spoje. Optimální dávkování bylo stanoveno dle výsledků kohezního porušení na 0,5 % NCB. Tato skutečnost byla ověřena i pomocí mikroskopické analýzy, kdy byly zjištěny větší hodnoty proniku směsi modifikovaného primeru NCB do struktury dřeva u směsi s 0,5% plněním. U směsi s 3,0% plněním NCB byl pronik nižší, tudíž vytvoření mechanické vazby lepeného spoje bylo v případě 3,0% plnění menší, což bylo prokázáno i nižšími hodnotami kohezního poškození u této směsi.



Graf č. 4: Výsledky měření kohezního porušení při daných expozicích s NCB

9. Závěr

V rámci zadání diplomové práce byly v praktické části vyrobeny tři sady lepených vzorků dřeva epoxidovým lepidlem. Vzhledem k nízké duktilitě epoxidových pryskyřic a také z provedených rešerší byl zvolen postup předúpravy povrchu řeziva, nanesení primeru mající signifikantní vliv na stabilizaci vrstvy dřeva při objemových změnách, a finální lepení. Aplikace primeru a lepení proběhla kompletně v epoxidovém systému fy. Spolchemie. Pro zvýšení duktility primeru byla provedena jeho modifikace pomocí uhlíkových sazí, a to o velikosti částic v mikro a nano velikosti. Tyto sady vzorků byly posléze exponovány v daných prostředích dle normy ČSN EN 302-1. Byly vybrány expozice A1, A4 a A5. Na těchto exponovaných vzorcích pak byly provedeny podélné smykové pevnosti a stanovilo se kohezní porušení zkoušených vzorků. Doplnkově byla stanovena hloubka proniku lepidla do struktury dřeva pomocí fluorescenční mikroskopie.

Modifikace primeru probíhala pomocí CB. Množství plnění bylo stanoveno u směsí s MicroCB (MCB) na 1; 3; 5 a 10 % z množství lepidla. Dle výsledných smykových pevností a procenta kohezního porušení se ukázalo toto plnění primeru jako nevhodné. V další části experimentu pak byly hodnoty plnění upraveny na 0,5; 1; 3 a 5 % souběžně s tím, že byla provedena deaglomerizace částic pomocí ultrazvukového homogenizátoru na elementární nanovelikost částic. Podle dosažených výsledků bylo prokázáno, že velikost a příprava těchto částic má pozitivní vliv na chování lepeného dřevěného spoje. Tyto závěry byly potvrzeny dosaženými hodnotami procenta kohezního porušení smykové plochy. Se zvyšujícím se procentem porušení dřeva se namáhaná smyková oblast porušuje ztrátou kohezních sil adherendu, tudíž lepený spoj vykazuje vyšší únosnost a lze jej považovat za spolehlivý. Kvalitativně se spoj lepidla/adherendu posoudil i v případě lepených směsí s nanoCB i na hloubku proniku lepidla do struktury dřeva. Důkaz přítomnosti lepidla v lumenech buněk smrkového dřeva (v tracheidách), v buněčných stěnách či dřeňových paprscích byl proveden pomocí EPI-fluorescenčního mikroskopu. Byl potvrzen i vliv podílu částic na hloubku proniku, nejspíš jako vliv měnící se viskozity směsi lepidla.

Z výše uvedených výsledků lze usuzovat, že vhodnou modifikací epoxidových lepidel souběžně i s optimální volbou technologie předpřípravy povrchu dřeva lze dosáhnout adekvátní výsledků zaručující trvanlivý lepený spoj.

10. Literatura:

- [1] T. Alsmarker a kolektiv, Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5 Step1 – Navrhování a konstrukční materiály, překlad: Bohumil Koželouh, 1998 ISBN 80-238-2620-4
- [2] D.E. PACKHAM, University of Bath, Bath, UK, Handbook of adhesion – Second Edition, 2005, ISBN-13 978-0-471-80874-9 HB
- [3] Česká státní norma ČSN EN 391 (73 2835), Lepené lamelové dřevo – zkouška delaminace lepených spojů, Český normalizační institut, 2002, ICS 79.060.99
- [4] Česká státní norma ČSN EN 392 (73 2055), Lepené lamelové dřevo – smyková zkouška lepených spojů, Český normalizační institut, 1996, ICS 79.060.00
- [5] Česká technická norma ČSN EN 302-1 (66 8531), Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti, Český normalizační institut, 2004, ICS 83.180
- [6] Česká technická norma ČSN EN 302-2 (66 8531), Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 2: Stanovení odolnosti proti delaminaci, Český normalizační institut, 2004, ICS 83.180
- [7] W.R. Broughton and R.D. Mera, Review of Life Prediction Methodology and Adhesive Joint, Crown Copyright 1997, ISSN 1361-4061
- [8] Design and Analysis Software Kinloch, A.J., "Predicting the Lifetime of Adhesive Joints in Hostile Environments", MTS Adhesive Programme, Project 3: Environmental Durability of Adhesive Bonds, Report No 5, AEA Technology, Harwell, United Kingdom, January 1995.
- [9] Brown, R.P., Kockott, D., Trubiroha, P., Ketola, W. and Shorthouse, J., "A Review of Accelerated Durability Tests", VAMAS Report No.18, Edited by Brown, R.P., Versailles Project on Advanced Materials and Standards, 1995.
- [10] Nelson, W., "Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses", John Wiley & Sons, 1990.
- [11] Collings, T.A., Harvey, R.J. and Dalziel, A.W., "The Use of Elevated Temperature in the Structural Testing of FRP Components for Simulating the Effects of Hot and Wet Environmental Exposure", Composites, 24(8), 1993, pp 625-634.
- [12] Buchman, A., Holdengraber, Y., Dodiuk, H. and Kenig, S., "Durability of Polyurethanes Elastomers", Polymer for Advanced Technologies, 2(3), 1991, pp 137-147.
- [13] Ha, S.K. and Springer, G.S., "Nonlinear Mechanical Properties of a Thermoset Matrix Composite at Elevated Temperatures", Journal of Composite Materials, 23, 1989, pp 1130-1158.
- [14] Ghorbel, I. and Spiteri, P., "Durability of Closed-End Pressurized GRP Pipes under Hygrothermal Conditions. Part I: Monotonic Tests", Journal of Composite Materials", 30(14), 1996, pp 1562-1580.
- [15] River, B.H., "Accelerated, Real-Time Aging for 4 construction Adhesives", Adhesives Age, 27(2), 1984, pp 16-21.

- [16] Levi, D.W., Wegman, R.F., Ross, M.C. and Garnis, E.A., Use of Hot water Aging for Estimating Lifetimes of adhesive Bonds to Aluminium", SAMPE Quarterly, 7(3), 1976, pp 1-4.
- [17] Alexander Požgaj a kolektiv, Štruktúra a vlastnosti DREVA druhé vydanie, 1997, ISBN 80-07-00960-4
- [18] promotional flyer: ORION Engineered Carbons, Technical data Europe, Frankfurt 2012
- [19] promotional flyer: MOMENTIVE, Organo Functional Silane reactions mechanisms, Geneva 2012
- [20] SPOLCHEMIE, aplikační list – CHS-EPOXY 474/TELALIT 0492, 2012, www.spolchemie.cz
- [21] SPOLCHEMIE, aplikační list – CHS-EPOXY 531 – modifikovaná epoxidová pryskyřice na bázi Bisfenolu pro přípravu kompozic, 2012, www.spolchemie.cz
- [22] www.microscopy.berkeley.edu
- [23] Česká norma ČSN ISO 10365 (66 8509), Označení hlavních typů porušení lepeného spoje, Český normalizační institut Praha, 1995
- [24] Česká technická norma ČSN ISO 9142 (66 8538), Lepidla – Směrnice k výběru laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů, Český normalizační institut Praha, 2004, ICS 83.180
- [25] Česká technická norma ČSN EN 301 (66 8504), Fenolická a aminová lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – klasifikace a technické požadavky, Český normalizační institut Praha, 2007, ICS 83.180
- [26] Česká technická norma ČSN EN 14081-1+A1 (73 2823), Konstrukční dřevo obdélníkového průřezu tříděné podle pevnosti – část 1: Obecné požadavky, Český normalizační institut Praha, 2011, ICS 79.040
- [27] Česká technická norma ČSN EN 14080 (73 2831), Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo - Požadavky, Český normalizační institut Praha, 2013, ICS 79.060.99
- [28] technický list Silquest A-137, Momentive
- [29] <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/440213?lang=en®ion=CZ>
- [30] Aaserud, J., Larnøy, E. & Glomm, W.R. 2009. Alternative systems for wood preservation, based on treatment with silanes. *In*: Bergstedt, A. (ed.): Proceedings of the 5th meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering (WSE), October, 2009, Copenhagen, Denmark. Forest & Landscape Denmark, Copenhagen. ISBN 978-87-7903-437-2
- [31] J. Yang, Part i: Synthesis of aromatic polyketones via soluble precursors derived from bis(a-amininitrile)s Part II: Modifications of epoxy resins with functional hyperbranched poly(arylene ester)s, Dissertation thesis, 1998

11. Seznam použitých zkratk:

MIN	Minimální hodnota
MAX	Maximální hodnota
PRŮM	Průměr
SMODCH	Směrodatná odchylka
SEM	Střední chyba průměru
n	Počet vzorků
EPI	emulsion – polymere - isocyanate
MF	melamin - formaldehydová lepidla
UF	močovino - formaldehydová lepidla
MUF	melamin - močovino - formaldehyd
PF	fenol - formaldehydová lepidla
PRF	fenol – resorcín - formaldehyd
PU	polyuretan
RF	Rezorcín-formaldehydová a fenol-rezorcín-formaldehydová lepidla
Tg	teplota skelného přechodu
MCB	Mikro carbonblack
NCB	Nanocarbonblack
WF	(woodfailure) kohezní porušení

12. Přílohy

12.1. A – referenční vzorky

Číslo	Epoxy. 531 A1				
	<i>a</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>síla</i> [N]	<i>pevnost</i> [MPa]	<i>porušení</i> [%]
1	19,04	20,44	1486,100	3,82	45
2	19,77	20,24	1763,200	4,41	35
3	19,20	20,07	1623,000	4,21	55
4	19,47	19,80	1403,900	3,64	30
5	19,72	19,02	1537,300	4,10	55
6	19,53	20,30	1362,700	3,44	30
7	19,51	20,49	1730,900	4,33	45

	Epoxy. 531 A4				
	<i>a</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>síla</i> [N]	<i>pevnost</i> [MPa]	<i>porušení</i> [%]
1	21,12	19,86	1747	4,16	0
2	20,92	19,74	0	0,00	0
3	21,84	21,60	1617	3,43	0
4	20,11	19,98	1104	2,75	30
5	21,47	19,55	1394	3,32	0
6	20,65	19,88	0	0,00	0
7	21,67	20,72	1885	4,20	20

	Epoxy. 531 A5				
	<i>a</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>síla</i> [N]	<i>pevnost</i> [MPa]	<i>porušení</i> [%]
1	20,61	19,48	2070,000	5,16	20
2	20,67	18,25	1498,200	3,97	45
3	20,48	20,09	1369,100	3,33	20
4	20,72	20,07	1748,300	4,20	40
5	21,11	19,82	1272,000	3,04	35
6	20,76	20,24	2394,000	5,70	30
7	20,53	19,94	1755,400	4,29	35

12.2. B – modifikace pomocí MCB

	Epoxy. RGB 1 A1					
	<i>a</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>síla</i> [N]	<i>pevnost</i> [MPa]	<i>porušení</i> [%]	<i>pevnost</i> [MPa]
1	19,82	20,69	3983	9,71	10	7,47
2	19,85	20,85	1192	2,88	50	2,21
3	20,12	20,25	1834	4,50	20	3,46
4	19,78	20,30	3236	8,06	20	6,20
5	20,05	20,15	0	0,00	0	0,00
6	19,90	20,32	3033	7,50	20	5,77
7	19,65	20,75	1577	3,87	90	2,97
8	19,71	20,39	2955	7,35	90	5,66
9	19,70	20,67	3539	8,69	50	6,69
10	19,73	20,40	2342	5,82	70	4,48
11	19,68	20,13	3678	9,28	80	7,14
12	19,87	20,38	2387	5,89	80	4,53
13	19,83	20,43	2850	7,03	30	5,41

	RGB 3 A1					
	<i>a</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>síla</i> [N]	<i>pevnost</i> [MPa]	<i>porušení</i> [%]	<i>pevnost</i> [MPa]
1	20,19	20,10	2856	7,04	90	5,21
2	20,05	20,19	1740	4,30	100	3,18
3	20,03	19,89	2651	6,65	70	4,93
4	20,15	20,12	3380	8,34	50	6,18
5	20,15	20,06	3739	9,25	30	6,85
6	20,17	20,01	2315	5,74	100	4,25
7	17,89	19,41	1562	4,50	20	3,33
8	20,20	19,95	2437	6,05	90	4,48
9	20,00	19,98	2477	6,20	100	4,59
10	19,90	20,63	2192	5,34	30	3,96
11	20,10	20,08	2009	4,98	100	3,69
12	20,20	19,87	2469	6,15	90	4,56
13	20,24	19,92	2159	5,35	90	3,97
14	17,68	20,08	2582	7,27	100	5,39

	RGB 5 A1					
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>
1	20,08	20,43	3298	8,04	90	5,96
2	20,07	20,28	2698	6,63	100	4,91
3	20,05	20,14	3003	7,44	60	5,51
4	20,14	20,73	3100	7,43	80	5,50
5	20,00	20,58	2673	6,49	100	4,81
6	19,95	20,02	2807	7,03	80	5,21
7	19,97	18,92	3028	8,01	50	5,94
8	19,85	20,23	2538	6,32	100	4,68
9	19,85	20,05	2595	6,52	90	4,83
10	20,05	20,02	2295	5,72	100	4,24
11	20,36	20,88	2438	5,73	50	4,25
12	20,00	20,51	2496	6,08	80	4,51

	RGB 10 A1				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	19,92	19,87	3118	7,88	90
2	19,94	20,39	3220	7,92	40
3	20,00	20,49	2602	6,35	50
4	17,56	20,12	1475	4,17	30
5	20,07	19,82	2953	7,42	90
6	20,08	19,85	2679	6,72	90
7	20,14	20,00	2039	5,06	90
8	19,92	20,19	3478	8,65	40
9	20,00	19,98	3279	8,21	70
10	20,00	19,44	3074	7,91	80
11	17,70	19,87	1915	5,44	80
12	19,98	19,61	2499	6,38	60

	Epox. RGB 1 A4				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,74	20,02	906,600	2,08	0
2	21,60	20,32	0,000	0,00	0
3	21,38	19,90	0,000	0,00	0
4	21,88	20,64	0,000	0,00	0
5	21,80	20,38	0,000	0,00	0
6	21,13	20,32	0,000	0,00	0
7	21,60	19,90	158,900	0,37	0
8	21,38	20,69	112,900	0,26	0
9	21,72	20,32	0,000	0,00	0
10	21,88	20,26	982,300	2,22	20
11	21,66	20,26	1317,600	3,00	0

	RGB 3 A4				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,55	20,67	324	0,73	0
2	21,38	20,40	883	2,02	0
3	21,73	19,98	175	0,40	0
4	21,66	20,09	554	1,27	0
5	21,33	20,18	917	2,13	0
6	21,36	21,10	753	1,67	0
7	21,77	20,26	347	0,79	0
8	19,33	20,81	583	1,45	0
9	21,42	19,80	338	0,80	0
10	21,38	19,98	0	0,00	0
11	20,63	20,12	0	0,00	0
12	20,18	20,84	0	0,00	0
13	20,42	20,36	0	0,00	0
14	20,97	20,86	0	0,00	0

	RGB 5 A4				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,40	20,16	1345	3,12	10
2	21,20	19,82	621	1,48	0
3	21,71	20,37	739	1,67	0
4	21,43	20,35	652	1,50	0
5	21,39	20,61	385	0,87	0
6	21,60	20,50	579	1,31	0
7	21,58	20,76	976	2,18	0
8	21,16	20,24	339	0,79	0
9	21,46	20,24	589	1,36	0
10	21,20	20,69	918	2,09	0
11	21,22	20,54	493	1,13	5
12	21,35	19,32	12	0,03	0

	RGB 10 A4				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,44	20,49	418	0,95	0
2	21,16	19,32	439	1,07	0
3	21,34	19,12	1092	2,68	0
4	21,52	19,58	706	1,68	0
5	21,30	19,82	1021	2,42	0
6	21,44	19,93	553	1,29	0
7	21,60	20,29	422	0,96	0
8	21,24	19,67	922	2,21	0
9	21,17	19,98	981	2,32	0
10	19,19	19,94	4	0,01	0
11	17,91	19,80	343	0,97	0

	Epox. RGB 1 A5				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,42	20,65	1087	2,46	0
2	17,10	19,90	4	0,01	0
3	21,71	20,26	264	0,60	0
4	21,92	20,51	686	1,53	60
5	21,47	20,19	699	1,61	0
6	21,66	2,01	0	0,00	0

	RGB 3 A5				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,64	20,27	1135	2,59	0
2	21,48	20,53	739	1,68	0
3	20,93	20,54	881	2,05	0
4	18,77	20,43	732	1,91	60
5	21,22	20,24	893	2,08	0
6	18,85	20,15	481	1,27	0
7	21,58	19,87	1101	2,57	0
8	21,42	20,18	955	2,21	0
9	21,66	20,26	448	1,02	0
10	21,57	20,10	912	2,10	0
11	21,46	19,95	31	0,07	0
12	21,54	19,63	41	0,10	0
13	18,84	19,77	910	2,44	0

	RGB 5 A5				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,29	20,46	1373	3,15	10
2	21,43	19,06	1157	2,83	10
3	21,54	18,58	852	2,13	0
4	21,46	19,13	4	0,01	0
5	21,43	20,96	1481	3,30	0
6	21,56	20,48	346	0,78	0
7	21,22	21,31	1145	2,53	10
8	20,48	20,90	1285	3,00	5
9	21,01	20,43	1005	2,34	10
10	21,69	20,93	1522	3,35	10
11	21,67	20,63	1169	2,62	0
12	21,10	20,53	1735	4,00	30

	RGB 10 A5				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,52	19,75	1278	3,01	0
2	21,00	20,10	1140	2,70	5
3	20,96	19,53	4	0,01	0
4	21,26	19,97	1413	3,33	0
5	21,40	19,90	672	1,58	0
6	18,60	20,28	712	1,89	0
7	21,38	20,80	987	2,22	10
8	21,52	20,71	5	0,01	0
9	21,32	20,27	767	1,77	0
10	21,12	20,71	1058	2,42	0
11	21,18	20,53	0	0,00	0
12	20,94	20,35	0	0,00	0

12.3. C – modifikace pomocí NCB

	0,5 CB A1				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	19,30	18,75	1923,800	5,32	95
2	19,94	19,05	2176,000	5,73	100
3	19,12	18,50	1864,500	5,27	80
4	19,91	19,66	1593,300	4,07	40
5	19,90	20,24	1715,700	4,26	100
6	19,46	19,65	2199,000	5,75	40
7	19,97	20,23	2245,000	5,56	50
8	19,73	19,58	1783,200	4,62	55
9	19,95	21,02	1148,500	2,74	10
10	19,91	19,58	1232,300	3,16	100

	1,0 CB A1				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	19,90	19,49	1804,000	4,65	60
2	19,87	19,50	1960,700	5,06	10
3	19,98	19,41	2246,000	5,79	5
4	19,90	19,68	3010,000	7,69	20
5	20,15	18,50	2020,000	5,42	100
6	20,04	19,96	1614,100	4,04	90
7	19,95	19,74	3148,000	7,99	5
8	19,84	20,38	2109,000	5,22	100
9	19,96	19,22	2503,000	6,52	95
10	20,10	19,49	2552,000	6,51	95

	2,0 CB A1				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	20,01	18,62	1634,200	4,39	0
2	20,01	19,47	2148,000	5,51	70
3	20,01	19,30	1547,400	4,01	20
4	19,68	18,97	1863,100	4,99	55
5	19,68	18,92	905,500	2,43	0
6	19,94	18,90	0,000	0,00	0
7	19,84	20,15	3186,000	7,97	85
8	19,51	19,71	1172,300	3,05	5
9	19,96	20,51	2309,000	5,64	0

	3,0 CB A1				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	19,81	18,28	2802,000	7,74	75
2	20,15	18,33	1936,600	5,24	0
3	19,48	18,01	843,100	2,40	0
4	19,93	19,85	2303,000	5,82	95
5	19,40	19,66	1446,000	3,79	5
6	19,45	20,23	0,000	0,00	0
7	19,96	20,44	1531,000	3,75	0
8	20,22	19,32	1319,000	3,38	0
9	19,67	19,54	970,200	2,52	0

	0,5 CB A4				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	21,30	20,08	1749,1	4,09	85
2	20,22	19,90	2048,0	5,09	75
3	20,31	19,89	1969,2	4,87	90
4	20,42	20,12	1688,3	4,11	50
5	21,01	20,06	1657,4	3,93	100
6	20,30	20,01	2041,0	5,02	95
7	20,42	19,41	1722,2	4,35	70
8	20,31	19,95	2253,0	5,56	85

	1,0 CB A4				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	20,51	19,76	1693,4	4,18	40
2	21,34	21,31	1874,0	4,12	20
3	20,95	20,44	2203,0	5,14	60
4	20,36	19,18	2076,0	5,32	100
5	21,09	20,10	1895,0	4,47	30
6	20,96	19,30	1645,4	4,07	10

	2,0 CB A4				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	20,27	20,43	1620,2	3,91	25
2	19,83	20,32	0,0	0,00	0
3	20,65	19,06	1879,3	4,77	40
4	20,70	19,42	2297,0	5,71	70
5	21,23	19,30	1662,5	4,06	50
6	20,83	20,51	2187,0	5,12	10
7	20,90	20,22	2231,0	5,28	40
8	20,74	20,45	2132,0	5,03	5
9	20,55	20,32	1516,7	3,63	0
10	20,38	20,53	1977,6	4,73	85
11	20,14	20,08	0,0	0,00	0

	3,0 CB A4				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	20,07	20,14	0,0	0,00	0
2	20,02	19,22	0,0	0,00	0
3	20,76	19,55	781,3	1,93	0
4	21,02	20,15	1453,4	3,43	20
5	20,73	19,75	1445,1	3,53	100
6	20,44	19,35	1298,2	3,28	10
7	20,38	19,83	972,7	2,41	25

	0,5 CB A5				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	20,22	18,75	1615,500	4,26	70
2	20,50	19,05	2158,000	5,53	75
3	20,05	18,50	1573,800	4,24	90
4	20,05	19,66	1602,200	4,06	85
5	20,92	20,24	2339,000	5,52	35
6	20,84	19,65	1913,000	4,67	100
7	20,20	20,23	2210,000	5,41	50
8	20,61	19,58	2357,000	5,84	35
9	20,69	21,02	1777,700	4,09	0
10	19,42	19,58	1504,100	3,96	100
11	20,14	20,23	1507,600	3,70	45
12	20,37	18,76	1176,200	3,08	90

	1,0 CB A5				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	20,70	18,24	752,700	1,99	0
2	20,90	19,70	1319,500	3,20	10
3	20,52	20,19	1838,500	4,44	0
4	20,68	19,30	1315,200	3,30	0
5	20,78	20,20	498,800	1,19	0
6	20,68	19,76	681,600	1,67	0
7	20,95	20,69	1111,500	2,56	5
8	21,18	19,75	2111,000	5,05	25
9	20,63	19,13	1822,600	4,62	15
10	20,74	19,42	1662,600	4,13	10
11	20,64	20,11	591,000	1,42	10
12	21,18	19,65	1539,100	3,70	15

	2,0 CB A5				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	20,08	21,61	1587,300	3,66	0
2	19,06	20,41	1657,900	4,26	20
3	19,73	20,42	1801,700	4,47	15
4	20,36	20,00	1686,200	4,14	90
5	20,60	21,70	2336,000	5,23	100
6	21,11	21,16	2076,000	4,65	40
7	19,89	20,48	1283,900	3,15	5

	3,0 CB A5				
	<i>a [mm]</i>	<i>b [mm]</i>	<i>síla [N]</i>	<i>pevnost [MPa]</i>	<i>porušení [%]</i>
1	20,63	19,84	1970,100	4,81	45
2	19,68	19,12	1259,700	3,35	20
3	19,73	18,64	1649,300	4,48	65
4	19,83	19,38	1287,500	3,35	75
5	19,81	19,56	1273,800	3,29	70
6	19,63	20,22	1056,100	2,66	0
7	20,00	19,70	1522,900	3,87	40
8	19,28	19,20	1765,900	4,77	5
9	19,98	19,30	0	0,00	0