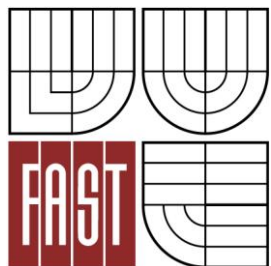




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# KOMPLEXNÍ STUDIUM INTERFÁZOVÉHO ROZHRANÍ LEPENÉHO DŘEVĚNÉHO SPOJE

STUDY OF THE INTERPHASE REGION OF WOOD BONDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

DAVID CHLUP

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2016



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	David Chlup
<b>Název</b>	Komplexní studium interfázového rozhraní lepeného dřevěného spoje
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2015
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

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

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

## **Podklady a literatura**

OSTEN, M. Práce s lepidly a tmely. 3. vyd. Praha: SNTL, 1986. 285 stran

SELBO, M. Adhesive bonding of wood. New York: Drake, 1978, 122 p.

ROWELL, Roger M. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton: CRC Press, 2005, 485 p.

## **Zásady pro vypracování**

Pro zajištění řádné adheze lepeného spoje hraje důležitou roli mechanická vazba vytvořená mezi adhezivem a dřevěným adherendem. Případná nedostatečná penetrace lepidla vede ke snížení této vazby. Optimální množství epoxidového lepidla pak vede k tomu, že je vytvořena řádná a funkční lepená spára, která zajistí řádné propojení se strukturou dřeva a zajistí účinnější přenos napětí mezi jednotlivými lepenými lamelami. V teoretické části budou popsány veškeré typy vazeb adheze. Dále bude pozornost zaměřena na způsoby zjišťování proniku lepidel do buněčné struktury. Kromě mikroskopických technik detekující přítomnost v lumenu buňky budou z rešerší vyhodnoceny metody, kterými je možné identifikovat pronik lepidla do buněčné stěny.

S ohledem na plnění lepidel částicovými plnivy je ovlivněna jejich viskozita. Pro tyto účely bude v dílčí experimentální části pro různé typy lepidel provedena analýza vlivu plnění na hodnotu viskozity a následně na hloubku proniku do struktury dřeva.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá sumarizací poznatků o problematice týkající se hloubky průniku lepidla do struktury dřeva. Popisuje veškeré teorie adheze. Zaměříme se na vliv viskozity a trvanlivost lepené spáry při různém množství plnění lepidla. Dále jsou popsány některé mikroskopické techniky, podle kterých se měří penetrace lepidel do buněčné struktury.

## **Klíčová slova**

Adheze, teorie adheze, lepidla na dřevo, penetrace, viskozita, mikroskopické metody

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with summarizing knowledge on issues related to the penetration depth of the adhesive into the wood structure. In the thesis they are described all adhesion theories. We focus on the effect of viscosity and durability bond line according to varying amounts of filler adhesive. Furthermore, it is described some microscopic techniques, which measure the penetration of the adhesive into the cell structure.

## **Keywords**

Adhesion, adhesive theory, wood adhesives, penetration, viscosity, microscopic methods

## **Bibliografická citace VŠKP**

David Chlup *Komplexní studium interfázového rozhraní lepeného dřevěného spoje*. Brno, 2016. 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

**Prohlášení:**

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

V Brně dne 26. 5. 2016

.....  
podpis autora  
David Chlup

## **Poděkování**

Mé poděkování za odborné vedení, rady a pomoc patří především vedoucímu mojí bakalářské práce panu doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. Zároveň bych rád poděkoval doktorandovi Ing. Martinovi Labajovi za pomoc a trpělivost při měření na některých laboratorních přístrojích.

## Obsah

TEORETICKÁ ČÁST .....	11
1. Úvod .....	12
2. Teorie adheze.....	13
2.1. Mechanická teorie .....	13
2.2. Chemická adheze .....	14
2.3. Elektrostatická teorie.....	15
2.4. Difúzní teorie.....	16
2.5. Teorie smáčení .....	17
2.6. Teorie slabé mezní vrstvy .....	18
2.7. Shrnutí teorií adhezí.....	19
3. Definice lepení a lepidel .....	19
4. Vliv vlastností lepeného spoje na kvalitu adheze .....	20
4.1. Vliv dřeva .....	20
4.1.1. Druh dřeviny .....	20
4.1.2. Geometrie povrchu .....	20
4.1.3. Smáčivost.....	21
4.1.4. Čistota povrchu .....	22
4.1.5. Propustnost pro plyny.....	22
4.1.6. Soudružnost povrchu.....	22
4.1.7. Bobtnání .....	22
4.2. Vliv lepidla.....	23
4.2.1. Složení a tvar makromolekuly .....	23
4.2.2. Molekulová hmotnost.....	23
4.2.3. Viskozita .....	23
4.2.4. Zásaditost a kyselost.....	24
4.2.5. Homogenita .....	24

4.2.6.	Objemová stálost filmu lepidla.....	24
4.2.7.	Množství plniva a jiných podpůrných látek .....	24
4.3.	Ostatní faktory ovlivňující kvalitu adheze .....	24
5.	Složky lepících směsí .....	25
5.1.	Filmotvorná složka .....	25
5.2.	Plniva .....	25
5.3.	Nastavovadla, retardéry .....	25
5.4.	Tvrdidla .....	25
6.	Popis buněčné stěny .....	26
6.1.	Střední lamela (ML) .....	27
6.2.	Primární stěna (P).....	27
6.3.	Sekundární stěna (S) .....	27
7.	Mikroskopické techniky zjišťování průniku lepidla do lumenu buňky .....	29
7.1.	Fluorescenční mikroskopie .....	29
7.2.	Optická mikroskopie s fotometrem.....	29
	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	33
8.	Cíl práce .....	34
9.	Metodika práce .....	35
9.1.	Materiály .....	35
9.2.	Zkušební postupy.....	35
9.2.1.	Stanovení torzního momentu .....	35
9.2.2.	Stanovení hloubky průniku.....	36
9.2.3.	Vliv plnění na trvanlivost lepené spáry.....	37
10.	Výsledky zkoušek .....	39
10.1.	Stanovení torzního momentu .....	39
10.2.	Stanovení hloubky průniku.....	40

10.3. Stanovení podélné smykové pevnosti dřevěných slepenců.....	43
11. Závěr .....	46
12. Seznam použité literatury .....	48
13. Seznam norem .....	50
14. Seznam použitých zkratk.....	50

# **TEORETICKÁ ČÁST**

## 1. ÚVOD

Lepení dřeva započalo již ve starověkém Egyptě, kde se pomocí organických lepidel slepovaly dýhy dřeva pro výrobu různých ozdob. V dnešní době se využívání lepidel zaměřuje spíše pro praktické použití v oboru dřevěných nosných konstrukcí od lepení mikroskopických vláken (např. FRP vlákna) až po slepování masivních lamelových nosníků v nosných konstrukcích.

Zkoumání mechanismů, které jsou odpovědné za adhesivní vazby, se díky technickému pokroku začalo široce věnovat teprve v posledních desetiletích. Zkoumáním interfázového rozhraní adheze v mikroskopickém měřítku vedlo ke vzniku několika teorií popisujících princip adheze. Přestože dodnes neexistuje unifikovaná teorie, která by popsala princip lepení v celém měřítku, dokážeme vytvořit na základně známých faktů dostatečně kvalitní lepidlo, aby vyhovovalo požadavkům na lepený materiál.

Trendem dnešní doby ve všech odvětví průmyslu je snaha snížit dopady na životní prostředí při získávání, výrobě či zpracování produktů. Intenzivní výzkum v oblasti interakce lepidla s různými druhy adherendů přispívá k objevování stále nových poznatků o chování lepeného spoje. Proto současně vznikají desítky nových modifikací lepidel se stále specifitějším použitím. A právě bližší znalost poznání o chování lepidel povede k cílenému využití lepidel pro konkrétní aplikaci, tudíž bude volba lepidel efektivní a tím i šetrná k environmentální politice.

## 2. TEORIE ADHEZE

Účinnost lepeného spoje závisí na několika faktorech. Z těch nejdůležitějších jsou adheze a koheze. Adhezi rozumíme přilnavost lepidla na povrch lepeného materiálu. Koheze je výsledek přitažlivých sil mezi jednotlivými molekulami lepidla. Na její hodnotě závisí zejména dobré mechanické vlastnosti lepidla a také pevnost spoje. Původ adhezivních sil se pokouší popsat několik teorií, které budou podrobně rozepsány.

Podle dřívějšího rozdělení (mechanický spoj, adsorpční/povrchová reakce, elektrostatická a difúzní teorie), které mělo popsat veškeré mechanismy adheze, je dnes teorie adheze rozšířena i o další teoretické modely. Veškeré stávající modely principu adheze jsou uvedeny v Tabulce 1 [1].

*Tabulka 1: Teorie adheze*

<b>Stávající modely adhezivní teorie</b>	<b>Rozsah působení</b>
Mechanická teorie	Mikroskopické
Elektrostatická teorie	Makroskopické
Difúzní teorie	Molekulární
Teorie smáčení	Molekulární
Chemická adheze	Atomové
Teorie slabé mezní vrstvy	Molekulární

### 2.1. Mechanická teorie

Podle této teorie, adheze nastává při vniknutí lepidla do pórů, dutin a jiných nepravidelností na povrchu. Lepidlo přemístí zachycený vzduch na rozhraní lepeného spoje. Proto se dospělo k závěru, že ke spojení dvou adherendů je zapotřebí proniknutí lepidla povrchovou drsností. Další ze závěrů tvrdil, že lepidla tvoří silnější vazby na porézním povrchu, než na hladkém povrchu. Tato teorie se brzy vyvrátila, neboť bylo zjištěno, že i na hladkém povrchu se vykazují vysoké pevnosti spojů.

Zvýšená přilnavost po obrušování povrchu adherendu může být způsobeno mechanickým propojením obou adherendů, vytvořením čistého povrchu, tvorbou vysoce reaktivního povrchu a zvýšení kontaktní plochy. Tím se docílí lepšího smáčení a složitější chemické vazby [1].

## 2.2. Chemická adheze

Atomy prvků v molekule jsou vázány chemickými vazbami, které se mohou rozdělit na primární a sekundární. Mezi primární zahrnujeme vazby elektrovalentní (iontové), kovové a kovalentní. Liší se především oblastí výskytu a hodnotami disociační energie potřebné k jejich zrušení. Za sekundární vazby považujeme síly fyzikálního charakteru, u kterých předpokládáme přitažlivé síly mezi molekulami. Patří mezi ně síly Van der Waalsovy, které se dále dělí na elektrostatické síly Keesomovy, indukční síly Debyeovy a Londonovy disperzní síly.

Ke vzniku specifické adheze, mezi adherendem a adhezivem, nastane dle teorie většiny autorů ve dvou fázích. V první fázi dochází k dokonalému kontaktu mezi lepidlem a adherendem. Poté co se oba povrchy spojí, nastává druhá fáze. V tento moment se pomocí sekundárních chemických vazeb navážou molekuly a dojde ke specifické adhezi [2].

Principem elektrostatických sil Keesomových je vzájemné působení permanentních dipólů. Tyto dipóly vznikly asymetrickým rozložením elektrických nábojů v molekule. Vazebné atomy nemají vždy stejnou vzdálenost elektronů, proto se většinou přiblíží slabší atom k silnějšímu. Tím získá přitažený atom záporný náboj a kladný náboj atom silnější.

Molekuly lze rozlišit podle polohy elektricky aktivních míst na:

- molekuly bez aktivních míst – nepolární
- molekuly s aktivně negativními místy – negativně polární
- molekuly s aktivně pozitivními místy – pozitivně polární
- molekuly s aktivně pozitivními a aktivně negativními místy – pozitivně a negativně polární

Adhezní vlastnosti jsou dále závislé na struktuře a rozpustnosti spolu působících látek. Keesomovy síly se také označují jako interakce dipól- dipól.

Indukční síly Debyeovy neboli interakce dipól – indukovaný dipól, nemají pro lepení další význam. Vznikají interakcí permanentním dipólem a částicí, která je ovlivněná nábojem z vnějšího elektrického pole.

Posledním druhem Van der Waalsových sil jsou síly disperzní (Londonovy síly). Vznikají vzájemnou polarizací molekul, ve kterých dochází k protisměrnému

pohybu valenčních elektronů mezi atomy. Dosahují krátkých vzdáleností a jsou závislé na teplotě prostředí [2].

Do chemické teorie patří také vliv vodíkových můstků. Nejedná se zde o chemickou vazbu, nýbrž se jedná o interakci již zmíněného vodíku ochuzeného o elektrony s elektronegativním atomem (dusíkem, kyslíkem nebo fluorem), který má elektronů přebytek. Můstky významně přispívají při adhezi k tvorbě kohezivního filmu lepidla.

Polární skupiny mohou být do lepidel zaváděny nejen syntetickou cestou, ale i přidavkem mísitelných nízkomolekulárních produktů a změkčovadel [2].

*Tabulka 2: Příklady energií Van der Waalsových sil a chemických vazeb [1]*

Typ vazby	Příklad	E (kJ/mol)
Kovalentní	C ... C	350
Iont-iont	Na <sup>+</sup> ... Cl <sup>-</sup>	450
Iont-dipól	Na <sup>+</sup> ... CF <sub>3</sub> H	33
Dipól-dipól	CF <sub>3</sub> H ... CF <sub>3</sub> H	2
Londonovy disperzní síly	CF <sub>4</sub> ... CF <sub>4</sub>	2
Vodíkové můstky	H <sub>2</sub> O ... H <sub>2</sub> O	24

### 2.3. Elektrostatická teorie

Derjagin a kol. [2] v roce 1948 až 1950 provedli experiment, ve kterém bylo zjištěno, že existuje závislost přilnavosti filmu lepidla na rychlosti odtržení spoje. Jednalo se o měření energie ve vakuu, která byla potřebnou k přetržení spoje lepidla a kovu. Přitom byla vizuálně a elektromagneticky zaznamenaná emisivita elektronů. Podle toho vyslovili závěr, že při těsném kontaktu nestejných polymerů nebo polymeru a kovu dochází k přenosu elektronů z jednoho materiálu do druhého. Dochází k vytvoření dvojvrstvy na hranici spoje, kde je jedna vrstva bohatší a druhá chudší na elektrony. Při oddalování se mění potenciál až do bodu roztržení, kdy se tento potenciál vyrovná. Proto se zrychlováním odtržení zmenšuje tok přechodu elektronů a tím klesá pevnost.

Lze však také namítnout nedokonalost této teorie. Nevysvětluje vztahy v nenamáhané spáře. Dále se nezmiňuje o vzájemné adhezi nepolárních materiálů, které nedokážou utvořit dvojvrstvu [2].

## 2.4. Difúzní teorie

Teorie pochází z roku 1959 až 1963, kdy ji vypracoval S. S. Vojuckij a kol. [2]. Hlavním znakem je prostup molekul jedné látky do druhé pomocí tzv. mikro-Brownova pohybu molekul. Teorie platí v případě, pokud jsou látky navzájem mísitelné a makromolekuly adherendu i adheziva vykazují dostatečnou pohyblivost. Rovněž se předpokládalo, že dochází k difúzi pouze mezi polymerními látkami s relativně dlouhými řetězci molekul. Toto tvrzení je v dnešní době vyvráceno, jelikož jsou již poznatky z difúze lepených dřevěných spojů.

K pozorování jevu difúze se využívá přibarvených fluoreskujících barviv přidaných do jedné ze složek. Z provedených pokusů se docílilo těchto vztahů:

- Doba kontaktu adherendů a lepidla závisí na účinnosti adheze
- Zvětšující se tlak zvyšuje kontaktní plochu a tím i množství difundujících molekul
- Se zvyšující se teplotou se zrychluje difúze molekul
- Menší molekuly difundují rychleji, ale jsou méně kohézní
- Složité molekuly a kopolymery s krystalickou strukturou snižují adhezní účinky

Pro zlepšení difúzních účinků dosáhneme použitím změkčovadel, které usnadní pohyb mezi lineárními makromolekulami. Pádným příkladem účinnosti této teorie je autoadheze polystyrenu, kde se využívá pouze rozpouštědlo k vytvoření lepivé vrstvy [2].

Podle jiné literatury teorie difúze lze určit míru difúzní vazby (2) pomocí transformace vztahu pro hustotu kohezivní energie (1). Nejsilnější vazbu docílíme, pokud bude mezi adherendem a adhezivem srovnatelná rozpustnost [1].

$$CED = \frac{E_{coh}}{V} \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{E_{coh}}{V}} \quad (2)$$

CED ... Hustota kohezivní energie – *Cohesive energy density* [J·m<sup>-3</sup>]

E<sub>coh</sub> ... Energie potřebná k odtržení molekul

V ... Molární objem

δ ... Parametr rozpustnosti

Dobrým příkladem difúzního charakteru je adheze polyetylenu nebo polypropylen na butylkaučuk. Na účinky této adheze má zásadní vliv teplota. Pokud teplota překročí bod tavení obou složek, dojde k výraznému zvýšení pevnosti lepeného spoje.

Difúze do buněčné stěny dřeva byla dokázána při pokusu s polyethylenglykolem. Podle výsledků průniků bylo zjištěno, že polymery musí mít maximální relativní molekulovou hmotnost 1000, aby pronikly do buněčné struktury (Stamm 1964; Sellers 1994) [3].

Další pokus byl proveden na třech lepených spojkách, určených pro exteriérové použití. Byla zjištěna penetrace lepidla skrze buněčné stěny. Konkrétně lepidlo MDI (methylen bifenyl diisokyanát) prokázalo průnik složek, které navázaly na molekuly dřeva (Marcinko a kol. 1998) [4].

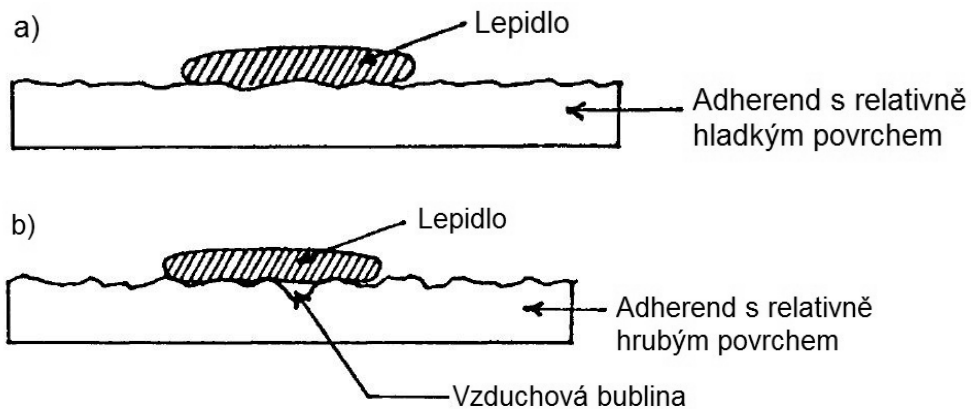
## **2.5. Teorie smáčení**

Tato teorie předpokládá, že adheze vychází z trvalého molekulárního kontaktu dvou materiálů, který je ovlivňován povrchovým napětím. Aby došlo ke smáčení, musí platit dvě podmínky pro smáčení povrchu. První podmínkou musí mít lepidlo povrchové napětí menší, než povrchové napětí pevného podkladu. Druhou podmínkou je minimální vzdálenost molekul obou povrchů, jelikož Van der Waalsovy síly jsou extrémně citlivé na zvětšení poloměru. Proto je důležitá hladkost a rovinnost povrchu, která se rozděluje na povrchy zcela a téměř smáčivé. Na nerovném podkladu se zmenšuje kontaktní plocha vlivem nezaplnění konvexních prohlubní mezi adhezivem a adherendem a tím zmenšuje pevnost vazby. Zcela smáčivý povrch zajišťuje nejpevnější vazbu mezi adherendem a lepidlem [1].

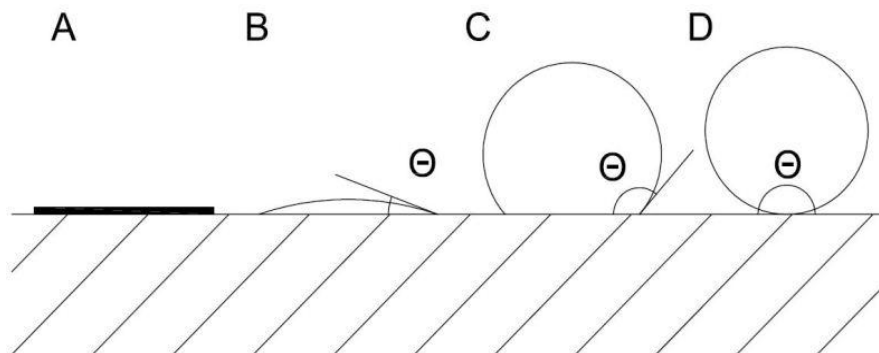
Podle výzkumu Haupta a Sellerse z roku 1994 smáčivost podkladu dřeva a tekuté pryskyřice požaduje minimální molekulární interakci 0,6 nm (6 Å) [3].

Pro správné smáčení platí:

- Ostrý kontaktní úhel mezi povrchem a lepidlem
- Menší viskozita lepidla pro roztečení po povrchu pevné látky
- Průnik lepidla do pórů pevné látky



Obr. 1: Příklad dobrého smáčení (a) a špatného smáčení (b) [1]



Obr. 2: Smáčení povrchu kapaliny

- A ... úplné smáčení povrchu ( $\Theta = 0$ )
- B ... částečné smáčení povrchu ( $0 < \Theta < \pi/2$ )
- C ... málo smáčivý povrch ( $\pi/2 < \Theta < \pi$ )
- D ... zcela nesmacháčený povrch ( $\Theta = \pi$ )

## 2.6. Teorie slabé mezní vrstvy

Poprvé byla tato teorie popsána Bikermanem [5]. Uvádí, že selhání vazby mezi adhirendem a adhezivem může způsobit buď kohezivní selhání nebo právě slabá mezní vrstva. Vznik této vrstvy nastane, pokud se mezi lepidlo a dřevo dostane nečistota. Ta způsobí oddálení obou vrstev a nedojde k řádnému smáčení. Dalším problémem je také drsný povrch. V tomto případě uvíznou vzduchové kapsy v nerovnostech a vzniknou póry, které snižují pevnost lepeného spoje [1].

## 2.7. Shrnutí teorií adheze

Je obtížné popsat adhezivní vazbu jako jeden individuální mechanismus, jelikož se většinou jedná o komplex fyzikálně-chemických procesů probíhajících současně. Přesto už známe už dost předpokladů a potřebných vlastností, abychom vytvořili látku splňující naše požadavky.

Všechny uvedené teorie se shodují v jednom. Aby mohla vzniknout adheze molekuly lepidla a substrátu, musí se molekuly přiblížit natolik, aby došlo k jejich interakci vlivem orientace pólů. Právě proto musí být lepidlo v kapalném nebo alespoň plastickém stavu v okamžiku lepení. Pro správné smáčení je potřeba, aby povrchové napětí lepidla bylo nižší, než napětí lepeného materiálu. Kvalita adhezivní vazby závisí také na charakteru povrchové vrstvy molekul substrátu.

## 3. DEFINICE LEPENÍ A LEPIDEL

Lepidlo je materiál, který aplikujeme na povrch dvou předmětů za účelem vytvoření trvalé vazby. Charakteristickým rysem lepidel je použití poměrně malého množství látky k hmotnosti konečného předmětu [2].

Pro lepení neexistuje nejvhodnější definice, která by celý proces popsala. Takto popsal definici Wu: *„Proces lepení je stav, ve kterém se dvě odlišná tělesa drží pohromadě v těsném mezifázovém kontaktu tak, že mechanická síla nebo práce může být převedena přes rozhraní. Mezifázové síly, které drží obě fáze, mohou vzniknout z van der Waalsovy síly, chemické vazby, nebo z elektrostatické přitažlivosti. Mechanická pevnost celého systému je určena nejen z mezifázových sil, ale také z mechanických vlastností mezifázového rozhraní a vlastností obou těles“* [6].

Existují dva základní typy lepeného spoje: konstrukční a nekonstrukční. Konstrukční spoj použijeme v případě, kdy adherendy (objekty slepené lepidlem) mohou být namáhány napětím až na mez kluzu. Konstrukční lepidlo musí být schopno přenášet zatížení bez ztráty integrity v rámci konstrukčního omezení. [1].

## 4. VLIV VLASTNOSTÍ LEPENÉHO SPOJE NA KVALITU ADHEZE

### 4.1. Vliv dřeva

#### 4.1.1. Druh dřeviny

Jelikož je dřevo organický materiál, vykazuje každý druh dřeviny odlišné vlastnosti. Rozhodující vlastnosti jsou množství přírodních pryskyřic, hustota dřeva, nasákavost nebo stáří dřeviny. Pro každý druh jsou typické makroskopické a mikroskopické znaky, které určují například pórovitost struktury nebo tvrdost. Pro konstrukční použití se nejčastěji používá smrkové dřevo (*Picea* spp.), který je velmi pružný, lehký, obsahuje málo pryskyřice a je dostupný.

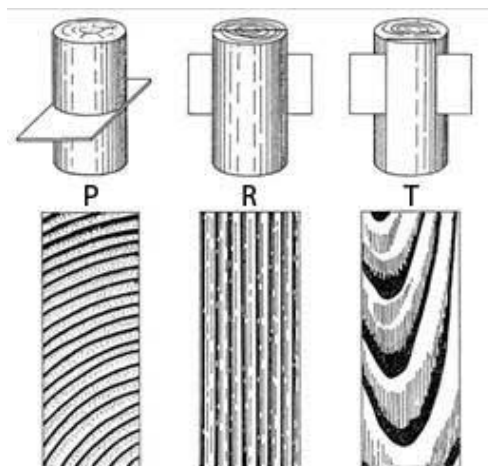
#### 4.1.2. Geometrie povrchu

Pro lepený spoj rozlišujeme tři základní typy povrchu:

- Viditelný povrch – daný konstrukčními rozměry spoje
- Mikropovrch – teoreticky možná styková plocha včetně všech nerovností a pórů
- Účinný povrch – skutečný povrch smáčený lepidlem

Má-li se ve spoji vytvořit souvislý, stejnoměrný film lepidla, je nutné, aby stykové plochy obou adherendů byly maximálně souběžné. Dřevěný povrch se považuje za stlačitelný, pro který platí přípustná odchylka v nerovnosti spáry  $\pm 0,02$  až  $0,01$  mm. Správné propojení nerovného materiálu a lepidla vyžaduje nízko-viskózní stav adheziva, které zarovná povrch vyplněním otevřených pórů a jiných nerovností [2].

Na geometrii povrchu má také vliv směr řezu, jelikož v každém směru má rostlé dřevo jinou strukturu.



Obr. 3: schématické znázornění základních řezů kmene. P – příčný, R – radiální, T – tangenciální řez [7]

#### 4.1.3. Smáčivost

Smáčivost je pozitivní vlastnost kapaliny a předpokladem pro správnou adsorpci, které se věnuje teorie smáčivosti. Tato vlastnost je spojená s povrchovým napětím kapaliny v interakci na pevnou látku. Podle chování kapaliny s nejvyšší hodnotou povrchového napětí, kterou má voda ( $0,0718 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ ), lze posuzovat chování i jiných kapalin, či lepidel při kontaktu s povrchem pevné látky.

Existuje několik způsobů, jak zjistit smáčivost kapalin. Jednou z nich je způsob kapkový. Zkouška se provádí nanesením kapky dané kapaliny s určitým průměrem na zkoušený povrch a pomocí optických přístrojů se měří dotkový úhel  $\Theta$  (viz v kapitole 2.5 Teorie smáčení). Jinou variantou je vyfocení kapky z vhodného úhlu a následně se podle fotografie určí úhel. V obou případech je možné doporučit dvacetinásobné zvětšení. Předpokladem adhezní aktivity podkladu je dotkový úhel menší než  $30^\circ$ .

Schopnost smáčet povrch nelze vždy předdefinovat. Většinou se konečná vlastnost mění v důsledku adsorpce cizích látek na povrchu, např. vzduch, prach, tuk, pot nebo okludovaná vlhkost. Ovlivnění schopnosti smáčet lze i záměrně přidáním vhodných látek, nebo úpravou povrchu (odmaštění, hydrofilace, oxidace chemickými a fyzikálními prostředky). Smáčecí účinnost se povětšinou záměrně zvyšuje, například přidávkou tenzidů (smáčedel), které snižují povrchové napětí. Negativním důsledkem snižování povrchového napětí lepidel je také snížení

koheze jejich filmů, což vede k citlivosti lepidla na zpěnění. V praxi se využívá proces fluorování epoxidových lepidel, kdy z původní hodnoty povrchového napětí  $0,044 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  snížíme na hodnotu  $0,024 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  [2].

#### **4.1.4. Čistota povrchu**

Aby došlo k dokonalé soudružnosti lepeného spoje, předpokládá se maximální kontakt lepidla s mikropovrchem adherendu. Je-li povrch znečištěn, snižuje se tato plocha a snižuje se pevnost spoje. Je-li nanesené lepidlo v kontaktu s cizím tělesem, je závislé pouze na adhezi tělesa s povrchem lepeného materiálu. Znečištění lze také popsat jako změna chemické povahy povrchu v důsledku mikrofilmu nežádoucí kapaliny, která může například elektrostaticky odpuzovat adhezivo od adherendu. V případě dřevěných spojů se musí dbát na odstranění cizorodých zrn, jako jsou piliny nebo třísky, vytvořené mechanickou úpravou povrchu dřeva [2].

#### **4.1.5. Propustnost pro plyny**

Podmínkou pro správnou propustnost je dobrá pórovitost obou adherendů. Vzhledem k povaze struktury dřeva je propustnost povrchu snadná a nevykazuje větší odpor. Proto lze předpokládat správnou penetraci lepidla [2].

#### **4.1.6. Soudružnost povrchu**

Soudružnost je dána složením adherendu, jeho strukturou nebo povrchovou úpravou. Obecně lze uvažovat, že se zvyšující se objemovou hmotností adherendu se zvyšuje soudružnost. Charakter povrchu je pevnější a odolnější proti mechanickému odtrhnutí. Naproti tomu materiály s nízkou soudružností nemohou vytvořit pevný spoj. Při změně vlhkosti se lepený spoj může porušit a v odtrženém lepidle budeme sledovat pozůstatky vláken z adherendu. Mezi materiály náchylné k odtržení můžeme uvažovat měkké dřevovláknité desky [2].

#### **4.1.7. Bobtnání**

Dřevo je materiál heterogenní a nasákvavý. Vlivem nabobtnání může zvětšit svůj objem ve směru podélném o 0,1 až 0,6 %, ve směru radiálním o 3 až 6 % a ve směru tangenciálním bobtná až o 6 až 12 % [8]. Vzhledem ke složení lepidel, které mohou obsahovat určité množství vody, je tato vlastnost velmi podstatná. Problém může nastat v případě zušlechťování povrchu aglomerovaných desek,

např. dřevotřískových a pazdeřových desek, laťovek, pomocí dých nebo laminačními fóliemi a lepidel obsahující vodu. Voda se zadržuje po delší dobu a nabobtnání jednotlivých částic z aglomerátu způsobuje nerovnost upravovaného povrchu [2].

## **4.2. Vliv lepidla**

### **4.2.1. Složení a tvar makromolekuly**

Podstatou adheziva je tvorba filmotvorné struktury, které jsou schopné vytvořit přírodní i syntetické makromolekulární látky. Výsledný tvar ztuhlého nebo vytvrzeného filmu lepidla je závislý na odolnosti vůči teplotě. Filmotvorné látky jsou rozděleny podle typu tvorby struktury. Lineární strukturu makromolekuly tvoří látky rozpustné v organických rozpouštědlech. Druhým typem jsou látky schopné tvorby trojrozměrné struktury. Jsou to látky močovinové, epoxidové, fenolické a polyuretanové a jiné pryskyřice. Vytvořený film ve spáře se teplem netaví ani nerozpouští [2].

### **4.2.2. Molekulová hmotnost**

Adhezi výrazně ovlivňuje relativná molekulová hmotnost, která je přímo úměrná k velikosti molekul. V případě, kdy překročí určitou hranici, dochází ke zpomalení pohyblivosti molekul a tím zhoršení orientace dipólů. Rovněž je ovlivněna možnost průniku molekul lepidla do buněčné stěny, zejména do kapilárního systému buněčné stěny vytvořeného jednotlivými mikrofibrilami celulózy.

### **4.2.3. Viskozita**

Viskozita určuje závislost vnitřního tření na rychlosti toku kapaliny. Jednotkou je  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ . Čím vyšší je hodnota viskozity, tím pomaleji látka teče. Je jednou z vlastností ovlivňující tokové vlastnosti lepidla. Závisí na obsahu a kvalitě plniva, obsahu a polymeračním stupni filmotvorné látky, na poměru rozpouštědla k ředidlu a na teplotě. Míra viskozity také rozhoduje o kvalitě kontaktní mikroplochy. V případě, kdy je vysoká viskozita, může dojít při nanášení na povrch k nedokonalému smáčení. Naopak při nízké viskozitě dojde k nadměrnému proniknutí lepidla do povrchu dřeva a spoj vykazuje nízké pojivové vlastnosti [9].

#### **4.2.4. Zásaditost a kyselost**

Pro správnou adhezi je důležitá také alkalita nebo kyselost obsažených složek lepidla. Jejich pH může ovlivnit soudržnost s povrchem a tím jakost spoje. Pro příklad může posloužit dvousložková fenologická lepidla vytvrzovaná roztoky fenolsulfanové nebo p-toluensulfanové kyseliny, které při přebytku tvrdidla mohou snižovat soudržnost povrchové vrstvy dřeva [2].

#### **4.2.5. Homogenita**

Důležitou podmínkou pro spolehlivé spoje je rovnoměrná disperze všech částic v celém objemu lepidla. Toto platí zejména pro více složkové lepidla s přidavkem nerozpustných plniv. Dalším faktorem může být reaktivita složek, které se musejí přidávat podle výrobcem daných postupů. Většinou platí, že tvrdidla se přidávají do směsi jako poslední. Špatná homogenita nemusí být zpravidla jen u složení lepidel z nerozpustných částic. Příčinou jsou buď nevhodné skladovací podmínky (promrznutí směsi), nebo prošlé datum spotřeby [2].

#### **4.2.6. Objemová stálost filmu lepidla**

Při přeměně fází z tekutého lepidla na tuhý film dochází k objemovým změnám, na které je nutné brát zřetel. Čím více je aktivních složek obsažených v lepidle, tím jsou objemové změny stálejší. Aktivními látkami se rozumí např. reaktivní rozpouštědla a sloučeniny zajišťující zesíťování struktury lepidla. Pro snížení objemových změn jsou výhodnější plniva minerálního původu, nebobtnavá. Dalším faktorem může být tloušťka filmu lepidla např. ve složitých konstrukčních spojích [2].

#### **4.2.7. Množství plniva a jiných podpůrných látek**

Modifikující látky mohou být inertní nebo reaktivní. V obou případech mohou ovlivňovat některé vlastnosti, které jsou pro kvalitu adheze podstatné. Ovlivňují například viskozitu, délku vytvrzení, lomovou houževnatost a další.

### **4.3. Ostatní faktory ovlivňující kvalitu adheze**

Kvalita adheze lepidla je ovlivňována mnoho dalšími faktory, které by mohly výrazně ovlivnit výsledek i přes ideální vlastnosti obou lepených látek. Mezi tyto faktory patří technologický postup přípravy lepeného spoje. Je důležité dodržovat

předepsané doporučení výrobců lepidel, které udávají například ideální okolní podmínky (teplotu, vlhkost), dobu přípravy lepidla, než dojde ke gelatinaci lepidla, správné skladování nebo poměr míchání tužidla, plniva a hlavní složky. Podstatný faktor je také doba a velikost síly lisování, než dojde k vytvrzení lepeného spoje.

## **5. SLOŽKY LEPÍCÍCH SMĚSÍ**

Hlavní složkou jsou makromolekulové látky, které musejí být rozpustné nebo dispergované v koloidním roztoku. Pro úpravu vlastností se přidávají další složky, aby lepidlo splnilo požadované nároky.

### **5.1. Filtrovatelná složka**

Jedná se o výše zmíněnou makromolekulovou látku v tekutém stavu rozplavenou v polárních kapalinách jako je voda, alkohol, aceton apod. Po odpaření kapaliny zůstane pouze potřebná látka, která tvoří spojovací prvek mezi lepenými plochami. Množství filtrovatelných látek ovlivňuje kvalitu lepidla [10].

### **5.2. Plniva**

Plniva nemají částečný lepící účinek. Jejich hlavním úkolem je snižování viskozity a tím zabraňování nadměrnému prosakování lepidel do povrchových vrstev, převážně při dýchování. Dále ovlivňují tloušťku samotného lepidlového filmu, nebo snížení vnitřního pnutí rozvedením do okolí. Nejčastěji se používá kaolin, plavená křída, dřevní moučka, bakelitová moučka nebo kaučuk [10].

### **5.3. Nastavovadla, retardéry**

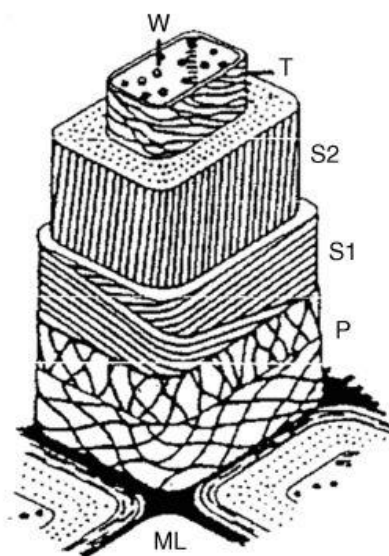
Nastavovadla mají částečné lepící schopnosti, prodlužují dobu vytvrzování a patří mezi ně například technická mouka, přírodní pryskyřice, apod. Stejně tak retardéry, jak už název napovídá, zabraňují předčasnému vytvrzování před dosažením potřebného lisovacího tlaku. Většinou se přidávají v množství 0,5–1,0 % z lepící směsi [10].

### **5.4. Tvrdidla**

Jsou to látky urychlující vytvrzení lepidel pomocí chemické reakce. Musejí se přidávat těsně před lepením [10].

## 6. POPIS BUNĚČNÉ STĚNY

Struktura dřeva je mikroskopická. Její většina se skládá z odumřelých anatomických elementů, jako jsou buněčné stěny a prostor mezi nimi (mezibuněčné prostory, lumeny). Vzhledem k přírodnímu charakteru materiálu dřeva musíme předpokládat jeho heterogenitu. Rozdíly buněk jsou dány jejich funkcí ve dřevě nebo stupněm vývinu. U buněčné stěny lze rozlišit několik vrstev, kdy od obvodu do středu buňky rozeznáváme: střední lamelu (ML), primární stěnu (P) a sekundární stěnu (S), která se skládá z dalších třech vrstev – vnější (S1), střední (S2) a vnitřní (S3). V buňce, za vnitřní sekundární stěnou S3, lze také někdy pozorovat ještě bradavičnatou vrstvu (S4 nebo W). Toto rozdělení lze nejlépe rozlišit u tracheid jehličnatých dřevin a libriformních vláken listnatých dřevin. Pokud nelze s přesností rozeznat jednotlivé vrstvy buněčné stěny, používá se termín složená střední lamela [11].



Obr. 4: Schéma struktury buněčné stěny anatomických elementů dřeva. ML – Střední lamela, P – primární stěna, S1 – sekundární stěna vnější, S2 – sekundární stěna střední, T (S3) – sekundární stěna vnitřní, W – bradavičnatá vrstva [http://chemstone.net/cellulose.htm]

### 6.1. Střední lamela (ML)

Hlavním úkolem střední lamely je spojovat sousední buňky, proto se někdy označuje jako lepící lamela. Její chemického složení a vlastnosti jsou odlišné od ostatních vrstev buněčné stěny. Obsahuje pektinové látky, hemicelulosy (převažují pentozany), 60–90 % ligninu (vzhledem k obsahu ligninu v celé buněčné stěně obsahuje 40–60 %). Složení a struktura ligninu se liší od ostatních vrstev buněčné stěny (má vyšší polymerizační stupeň). Podle druhu dřeviny závisí její tloušťka, která je velmi úzká a pohybuje se v průměru 0,1–0,3  $\mu\text{m}$  [11].

### 6.2. Primární stěna (P)

Je jediná vrstva buněčné stěny anatomických elementů dřeva ve fázi jejich růstu, která je tvořena ze síťovité celulosové kostry, hemicelulosy a pektinových látek. Její tloušťka je podobná jako vrstva střední, tedy 0,05–0,2  $\mu\text{m}$ . Obsahuje 7 – 15 % celulosy, která se ukládá do fibril. Vzhledem na rozložení těchto fibril, lze rozlišit v primární stěně další dvě vrstvy. Vnější primární vrstva (P1) má typickou disperzní strukturu celulosových fibril s výrazným odklonem od podélné osy buněk. Ve vnitřní primární vrstvě (P2) byly pozorovány různé úhly odklonu od podélné osy buněk. Za předpokladu, že fibrily celulózy prochází mezi oběma vrstvami primární stěny, lze vysvětlit pevnost i špatnou rozlišitelnost těchto vrstev. Celulosa v primární vrstvě má nižší polymerizační stupeň a podíl krystalické části než v sekundární stěně [11].

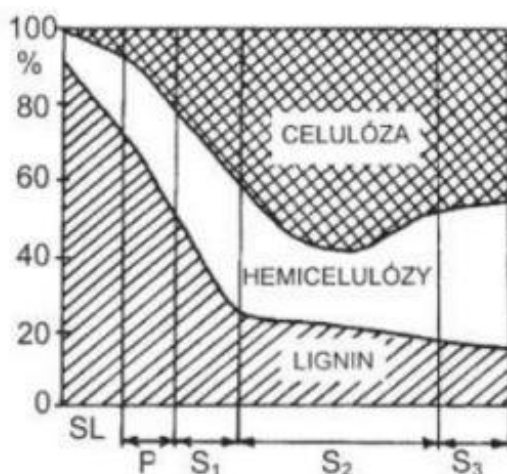
### 6.3. Sekundární stěna (S)

Jedná se o nejdůležitější vrstvu, jelikož zastupuje až 98 % obsahu buněčné stěny (tracheidy jehličnanů) a dodává anatomickým elementům dřeva charakteristický tvar. Skládá se z tří vrstev, které jsou lamelovitého charakteru. Jejich tloušťka se udává v poměru 10:80:10. Směrem od vnější (S1) vrstvy k vnitřní (S3) klesá zastoupení ligninu a stoupá podíl polysacharidů. Mezifibrilární prostor může být zaplněn vodou, či doprovodnými chemickými látkami [11].

**Vnější vrstva (S1)** – tloušťka vrstvy 0,1–0,04  $\mu\text{m}$ . Procentuální zastoupení ligninu je méně než celulózy, která tvoří 3–6 lamel a vyznačuje se podstatně vyšší uspořádaností fibril. Tyto fibrily jsou uspořádány v navzájem kolmých seskupeních a svírají s podélnou osou buňky 45–80°.

**Střední vrstva (S2)** – je nejvýznamnější vrstva buněčné stěny, jelikož tvoří převážnou část (50–90 %). Tloušťka se pohybuje v rozmezí 0,5–10  $\mu\text{m}$ , v závislosti na typu dřeviny, anatomickém elementu, stupněm vývinu a funkci ve dřevě. Jelikož se jedná o nejtlustší vrstvu, významně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a přispívá k anizotropii buněčných stěn. Orientace fibril celulosy je téměř rovnoběžná s podélnou osou anatomických elementů. V této vrstvě je největší zastoupení celulosy, následuje hemicelulosa a lignin s obsahem 5–20 %.

**Vnitřní vrstva (S3)** – je složena z 6 lamel, které jsou uspořádané v pravidelných celulosových fibril, nebo v síťovém uspořádání fibril. Z chemického hlediska zde převažuje celulosa a hemicelulosa. Lignin obsahují jehličnany, ale u některých listnáčů (např. vrba, bříza, buk) nebyla lignifikace zjištěna. U některých anatomických elementů (tracheidy, cévy, libriformní vlákna) se vyskytuje ze strany lumenu tenká amorfnní vrstvička (0,01–0,1  $\mu\text{m}$ ), pojmenovaná jako bradavičnatá vrstva (S4 nebo W). Tato vrstva obsahuje zaschlé cytoplasmy. Obě vrstvy sekundární buněčné stěny významně ovlivňují např. sorpci, difuzi a propustnost dřeva [11].

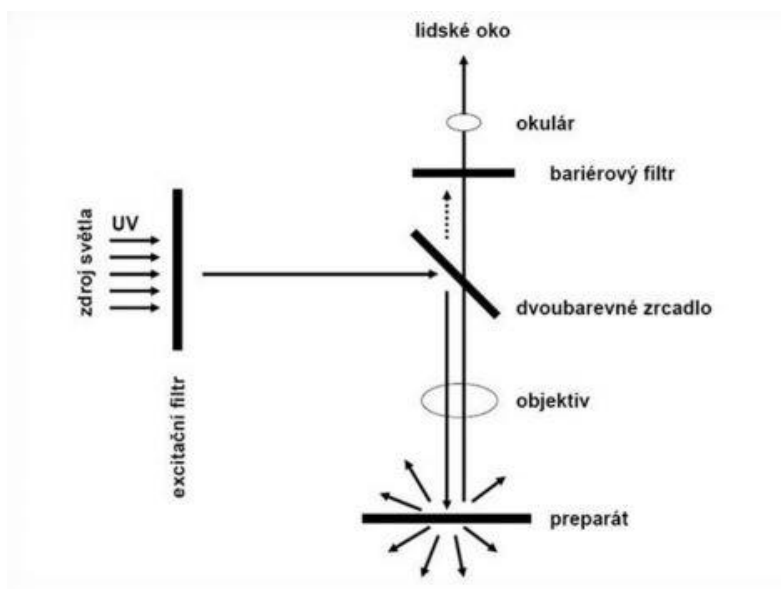


Obr. 5: Zastoupení chemických složek dřeva v jednotlivých vrstvách buněčné stěny [11]

## 7. MIKROSKOPICKÉ TECHNIKY ZJIŠŤOVÁNÍ PRŮNIKU LEPIDLA DO LUMENU BUŇKY

### 7.1. Fluorescenční mikroskopie

Při fluorescenci vyzařujeme světlo o určité vlnové délce, které dopadá na vzorek schopný luminiscence a ten způsobí emisi záření. K vytvoření obrazu se použije nezbytné množství světla, které obsahuje i neadsorbovanou část excitačního světla. Mikroskop obsahuje excitační filtr, který propustí pouze světlo potřebné pro fluorescenci vzorku. Při vyzaření upraveného světla o krátké vlnové délce projde světlo přes excitační filtr a dopadne na vzorek, který emituje záření o delší vlnové délce. Dále projde skrz odrážecím zrcadlem do bariérového filtru, který pohltí přebytečné excitační světlo a propustí do okuláru pouze fluorescenční světlo. Schopnost luminiscence vyvoláme přidáním látky schopné reagovat na fluorescenci (např. barvivo Rhodamin) [12].



Obr. 6: Schéma principu fluorescenční mikroskopie [12]

### 7.2. Optická mikroskopie s fotometrem

Fotometr je optický přístroj sloužící ke stanovení koncentrace látek v roztocích absorbujících elektromagnetické záření v ultrafialové nebo viditelné oblasti. Umožňuje měření jen při některých vybraných vlnových délkách. Polychromatické záření vysílané zdrojem prochází filtrem

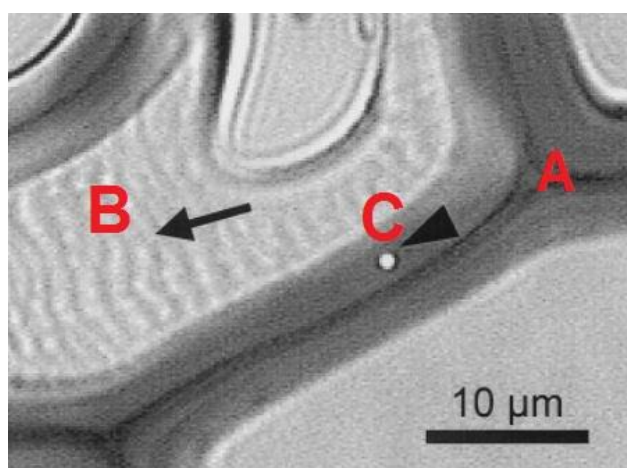
(typ monochromátoru), kyvetou se zkoumaným vzorkem (absorbuje záření o dané vlnové délce) a dopadá na detektor (převádí intenzitu prošlého záření na elektrický signál). Velikost výsledného elektrického proudu je měřena galvanometrem cejchovaným v jednotkách absorpance [13].

Podle výzkumu W. Gindla a kol. [14] bylo dokázáno, že je mikroskopie schopná zjistit přítomnost difundovaných molekul lepidla v buněčné stěně dřeva. Sledovanou látkou v předkládané studii bylo lepidlo MUF, které je vysoce absorpční při ultrafialovém spektru světla díky struktuře melaminu.

Podmínkou správné difúze je maximální molekulová hmotnost, proto byla přednostně změřena distribuce molekul pomocí gelové chromatografie. Pro zkoušku byly použity frakce s poloměrem pórů 100 Å a 500 Å. Dále byl do směsi přidán eluent DMF, který obsahoval 0,5 % LiCl [14].

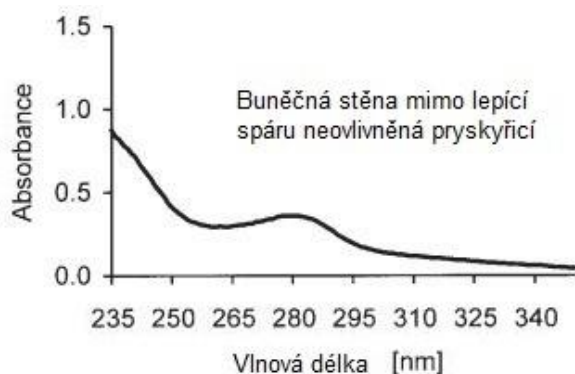
### Stanovení UV absorpance

UV absorpance spektra byla zpozorována ve třech místech s použitím fotometru MPM800. Nejdříve byla naměřena absorpance v sekundární buněčné stěně S2 tracheidy, které nebyla vyplněna lepidlem (vzdálená 0,5 mm od lepené spáry), ozn. oblast A. Dále byla naměřena hodnota absorpance čisté MUF pryskyřice vytvrzené v lumenu tracheidy v blízkosti lepené spáry (oblast B). Posledním sledovaným místem byla absorpance pryskyřice v S2 vrstvě v místě, které vykazovalo přítomnost lepidla v lumenu (oblast C). )

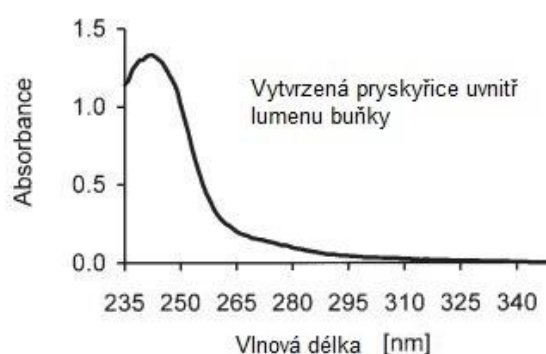


Obr. 7: Příčný řez lepené spáry. Měřená oblast C v buněčné stěně jako bílá tečka. Vytvrzená pryskyřice zanechala po řezání vlněnou strukturu (oblast B) [14]

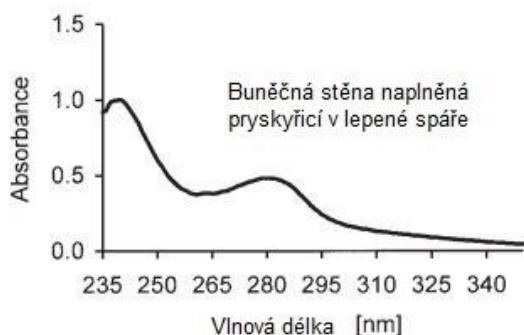
Při nastavení excitační šířky pásma monochromátoru na 5 nm a sledované emitující šířky pásma na 1nm byla naměřena absorbance spektra při vlnové délce 235 až 350 nm. Měřená oblast o průměru 0,5  $\mu\text{m}$  umožnila přesné umístění paprsku do buněčné stěny o šířce 3  $\mu\text{m}$ . Z každé lokality bylo naměřeno 50 hodnot, které se zprůměrovaly a tyto byly vyneseny do grafu (obrázky 8 až 10) [14].



Obr. 8: Absorbance v oblasti buněčné stěny bez lepidla [14]



Obr. 9: Absorbance v oblasti lumenu vyplněného lepidlem [14]



Obr. 10: Absorbance v oblasti buněčné stěny v blízkosti vyplněného lumenu lepidlem [14]

Absorbance neboli extinkce je veličina, která udává míru pohlcení světla měřeným vzorkem. Jedná se o logaritmičticky upravenou veličinu transmitací, která vyjadřuje míru pohlcení světla vzorkem. Exponenciální závislost koncentrace je ovšem pro praktické využití méně přesné, proto se udává absorbance, která má

lineární závislost na koncentraci do určité hodnoty (nejpřesnější měření lze určit z hodnot absorbance od 0 do 1).

### **Kvantitativní odhad difúze melaminu**

Absorbační spektra získané v různých místech vykazovaly významné rozdíly. Podle grafu z oblasti B lze popsat ovlivnění MUF v buněčném lumenu viditelným vrcholem absorpce na vlnové délce 242 nm. Naproti tomu v buněčné stěně mimo lepící spáru nevykazuje absorbance ve stejné vlnové délce maxima. V poslední oblasti C je v buněčné stěně ve vrstvě S2 patrný vrchol absorbance na vlnové délce 241 nm a na 280 nm.

Jelikož při absorpenci prochází záření směsí dvou látek, lze vyvodit při předpokládané koncentraci melaminu (vypočítané z podílu molekulových hmotností složek MUF) hodnoty absorpčního koeficientu a reálnou koncentraci melaminu v buněčné stěně. Pro výpočet byl použit vztah Beer-Lambertova zákona, podle kterého se dokázala koncentrace melaminu v buněčné stěně v množství  $6,2 \pm 0,12\%$  [14] [15].

Podle výsledků lze vyvodit, že existuje přímá úměra mezi mírou difúze a velikostí molekul. Tento jev byl popsán v rozsáhlé práci Stamma [3]. Naproti tomu bylo dokázáno Mantanisem a kol. [16], že relativně velké molekuly jako je pyridin a benzylalkohol mohou výrazně vniknout do buněčné stěny, vzhledem k jejich vysoké schopnosti vytvoření vodíkové vazby. Je nutné podotknout, že difúzní účinek zvyšuje také vyšší teplota látky. Jelikož při vytvrzování pryskyřice vzniká teplota až 120°C, zvyšuje se šance difúze molekul.

Na základě výzkumu s optickou mikroskopií s fotometrem byla dokázána penetrace molekul melaminu do buněčné stěny. Proto je tato metoda vhodná pro posuzování míry difúze adherendu [14].

# **EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

## 8. CÍL PRÁCE

V této bakalářské práci bylo cílem provést analýzu závislosti množství plniva na hodnotu viskozity lepidla a hloubku průniku takto plněného lepidla do buněčné struktury dřeva. Pro účely experimentu byla vybrána epoxidová pryskyřice, která má široké použití a je běžným lepidlem v konstrukčním odvětví. Má dobré pevnosti spojů (ve smyku 8 až 10 MPa), je stálá a trvanlivá [2]. Naopak jejími negativními vlastnostmi jsou nízká odolnost proti vlhkostní zátěži, křehkost v zatvrdlém stavu v důsledku vysoké povaze zesíťování. Vlastnost lze do jisté míry ovlivnit modifikováním zušlechťujícími plniv [17]. Tento fakt je důvodem, proč bylo v rámci experimentů zkoumán vliv množství plniv na viskozitu, na pevnost spoje a průnik do struktury dřeva.

Pro účel zjištění viskozity byl použit rotační viskozimetr Viskomat NT, ke změření hloubky proniku byla využita fluorescenční mikroskopie. Rovněž byla prokázána trvanlivost lepeného povrchu dřeva z takto připravených směsí.

## 9. METODIKA PRÁCE

### 9.1. Materiály

#### Dřevina

Pro účely našeho experimentu byl zvolen buk (*Fagus sylvatica*), který se užívá pro standardizované zkoušky lepených spojů. Dle jeho vlastností se řadí do středně těžkých dřevin s průměrnou objemovou hmotností při 0% vlhkosti  $685 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Dřevo je méně trvanlivé a málo odolné proti biotickým vlivům. Z mikroskopického hlediska je dřevo roztroušeně pórovité s výraznými dřeňovými paprsky v radiálním a tangenciálním směru. Jeho hlavní využití je v nenosných konstrukcích jako lepené dřevo nebo podlahy. Široké využití najdeme také v nábytkářství [18].

#### Lepidlo

Bylo vybráno nízkoviskózní dvousložkové epoxidové lepidlo *EPOLAM 2017* od společnosti *Axson Technologies*. Poměr směsi pryskyřice a tvrdidla byl 100:30. Pro plnicí složku byl vybrán kaučuk *Active rubber powder, AGP4 truck tyres (0-0,4 mm)*, který jsme dávkovali v pěti množstvích (10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 % k hmotnosti pryskyřice).

Tabulka 3: Vlastnosti *EPOLAMU 2017* dle technického listu [19]

Látka	Viskozita dle Broomfielda při 25°C	Hustota
	[mPa·s]	[kg/litr]
Epoxidová pryskyřice	2850	1,17
Tužidlo – standardní	20	0,96
Směs v poměru (100:30)	210	1,1

### 9.2. Zkušební postupy

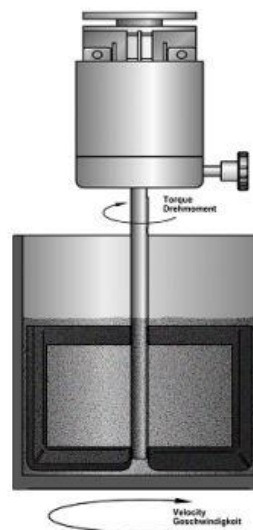
#### 9.2.1. Stanovení torzního momentu

Torzní moment neboli kroučící moment, je míra odporu tyče při otáčení kolem své osy. Torzní moment byl stanoven přístrojem viskozimetr Viskomat NT. Jedná se o rotační viskozimetr pro určení zpracovatelnosti jemnozrnných stavebních

materiálů s maximální velikostí částic do 2 mm. Je složen ze dvou válců a stacionárního vřetena. Vnější válcová nádoba zajišťuje stabilní teplotu při měření pomocí chladicí kapaliny. Uvnitř je nádoba naplněna s měřenou kapalinou. Při otáčení obou nádob se na stacionárním vřetenu měří točivý moment, který se průběžně zaznamenává.



Obr. 12: Rotační viskozimetr Viskomat NT



Obr. 13: Schéma měřícího zařízení [20]

Pro zkoušku bylo potřeba namíchat optimální množství lepidla, aby bylo možné vyvodit dostatečný torzní moment. Příprava přístroje Viskomat NT spočívala v zapnutí chladicího oběhu s chladicí kapalinou, která po dobu měření držela konstantní teplotu, předdefinování parametrů otáčení a doby míchání. Nejprve byly provedeny zkoušky jednotlivých složek lepidla a poté se namíchaly směsi s konkrétním množstvím plniva. Přístroj se nastavil na rychlost 100 ot/min (1,67 Hz) po dobu 2 minut. Měření probíhalo při konstantní teplotě 25°C. Zkouška proběhla do deseti minut od zamíchání tvrdidla. Výsledek byla hodnota torzního momentu (jednotka N·mm), vypočítaná softwarem přístroje.

### 9.2.2. Stanovení hloubky průniku

Při pokusu byl využit optický mikroskop Leica DM4000 M LED s využitím fluorescenčním pozorováním excitací zeleného světla. Do vzorku bylo přidáno barvivo Rhodamin B na bázi fluorochromu, které má schopnost luminiscence. Jde o vlastnost chemické látky po dopadu světla s kratší vlnovou délkou vyzařovat

světlo o delší délce ve formě jiné barvy – fluorescence. Ve výsledném obraze pak vidíme v okuláru emitované záření fluorochromem Rhodamin B.

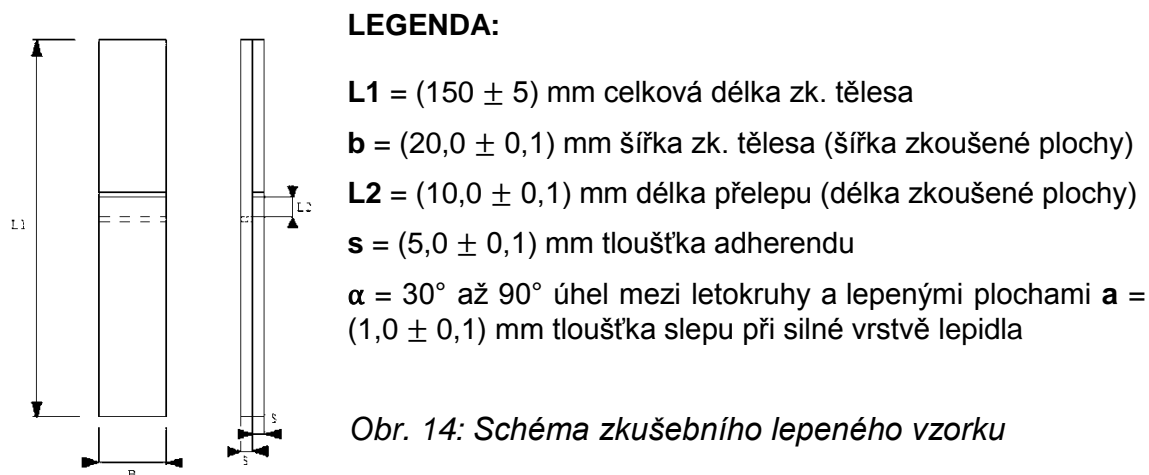
Byly připraveny záměsi epoxidu s různým množstvím plniva. Do těchto směsí byla přidána fluorescenční látka fluorochrom Rhodamin B. Jelikož je dodáván v práškové podobě, bylo potřeba ji rozmíchat v etanolu v poměru 1 g Rhodaminu B v 10 ml etanolu. Po zamíchání do směsi se nechal etanol vytékat, aby neovlivnil viskozitu. Následně bylo přidáno tvrdidlo a lepidlo bylo nanášeno o plošném nánosu  $350 \text{ g/m}^2$  na obě strany zkušební vzorku dřeva. Vzorky se uložili do lisovacího zařízení o tlaku 0,8 MPa po dobu 24 hod.

Po vytvrdnutí byl proveden odběr mikrotomických řezů. Vzorky se musely nejprve namočit do teplé vody, pro docílení lepší delaminace. Řez procházel kolmo na lepenou spáru s tloušťkou řezu v rozpětí několika mikrometrů. Vzorky se následně uložily na podkladní sklíčko a ve fluorescence proběhlo měření, jež bylo provedeno v softwaru mikroskopu.

### 9.2.3. Vliv plnění na trvanlivost lepené spáry

Tato zkouška se provádí dle ČSN EN 302-1, kdy se smyková pevnost slepenců stanoví vložním 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.

Připraví se dvě desky ze silného nenapařeného, ohoblovaného, rovně rostlého bukového prkna z jednoho kusu dřeva, s hustotou  $(700 \pm 50) \text{ kg}\cdot\text{m}^3$  při vlhkosti dřeva  $(12 \pm 1) \%$ . Úhel mezi letokruhy a lepenými plochami musí být  $30^\circ$  až  $90^\circ$ . Desky se rozřezou podle normových rozměrů uvedených v obrázku 14.



Po rozřezání vytvrzených slepených panelů je potřeba zkušební tělesa upravit v podmínkách expozic dle tabulky 4.

Zkoušení pevnosti se provádí na zkušebním zařízení s čelistmi pro tahové zkoušky. Po usazení vzorku do čelistí je namáháno, dokud se neporuší. Zaznamenává se zatížení při porušení. Druhá část zkoušky je vizuální posouzení lepené části povrchu pokrytého dřevěnými vlákny, které se hodnotí v procentech. Povrch bez zjevného zůstatku dřevních vláken se posuzuje jako 0 %, maximální zaplněná plocha odtržených vláken se hodnotí jako 100 %. Vyjadřuje se průměrná hodnota ze všech platných výsledků.



Obr. 15: Ponořené vzorky ve vařící vodě



Obr. 16: Zkušební zařízení pro smykovou pevnost

Tabulka 4: Typ a doba expozice před smykovou zkouškou dle ČSN EN 302-1

Označení	Expozice
A1	7 dní ve standardním prostředí při teplotě $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(65 \pm 5) \%$
A4	6 h ponoření ve vařící vodě
	2h ponoření ve vodě při $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$
	Zkouší se v mokrém stavu
A5	6 h ponoření ve vařící vodě
	2h ponoření ve vodě při $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$
	Opětné kondicionování ve standardním prostředí při teplotě $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(65 \pm 5) \%$ do dosažení původní hmotnosti
	Zkouší se v mokrém stavu

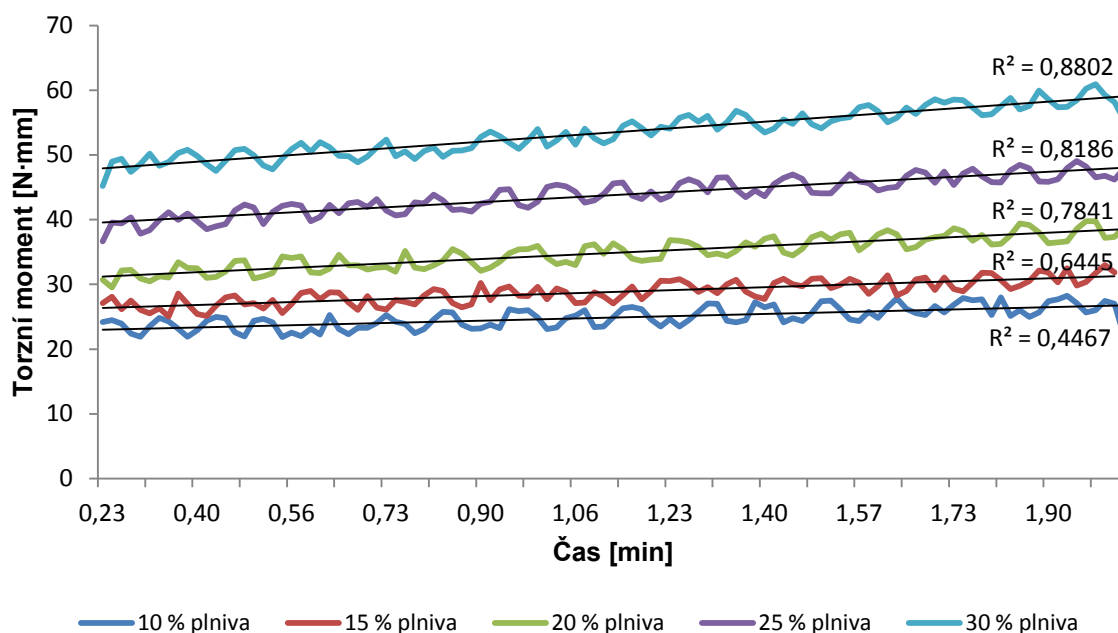
## 10. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

### 10.1. Stanovení torzního momentu

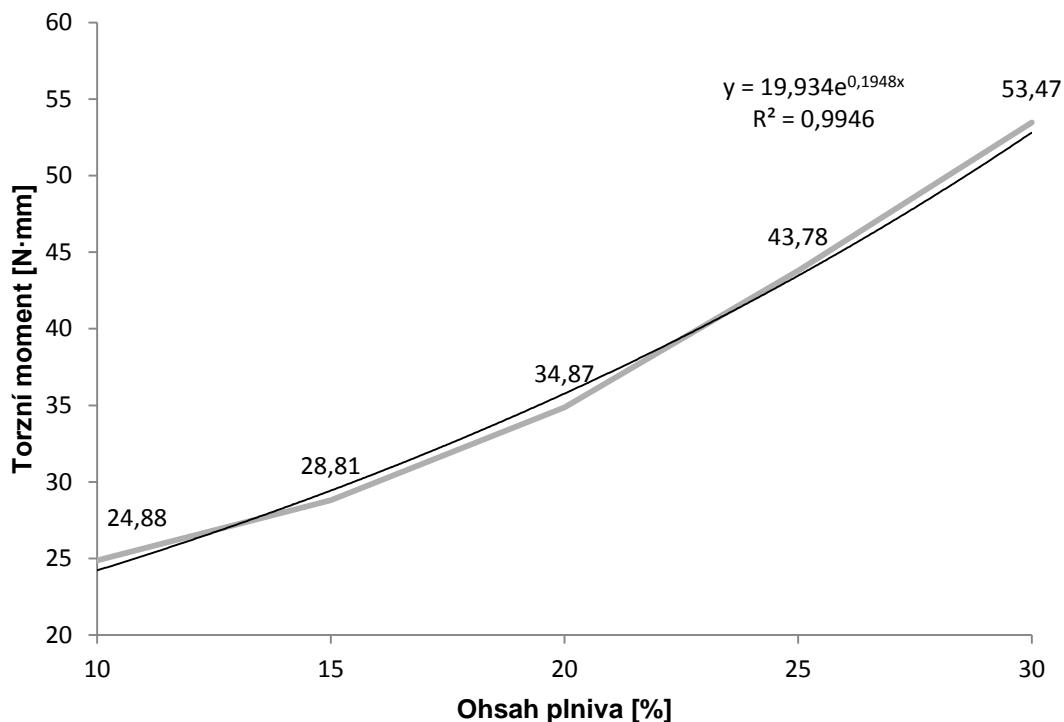
Výsledky torzních momentů jednotlivých směsí byly pro pryskyřici **110,14 N·mm**, tužidlo **3,89 N·mm** a směs pryskyřice s tužidlem **14,94 N·mm**. Dále byly změřeny torzní momenty každé směsi s přidavky plniva zaznamenané do histogramu. Hodnoty byly následně zprůměrovány a vloženy do grafu. Samotné měření v přístroji probíhalo po dobu 2 minut.

Vlivem zvýšení množství plniva došlo k zahuštění směsi, která zvýšila odpor vřetena přístroje, což se projevilo na vzrůstajícím charakteru torzního momentu.

Vzrůstající charakter během probíhající zkoušky na přístroji byl v důsledku několika faktorů. Prvním byl samotný proces míchání. Při proudění směsi dochází uvnitř ke tření, které vyvolává zvýšení teploty. Epoxidové lepidla jsou schopna při vyšších teplotách rychleji tvrdnout, proto lze sledovat pozvolný vznik síťové struktury v počátečním stavu tuhnutí. S ohledem na tuto skutečnost byla zvolena krátká doba měření ve viskozimetru, aby nebyla během celé doby manipulace ovlivněna výsledná referenční hodnota viskozity.



Obr. 17: Histogram torzního momentu lepidel s plnivem během měření 2 minut



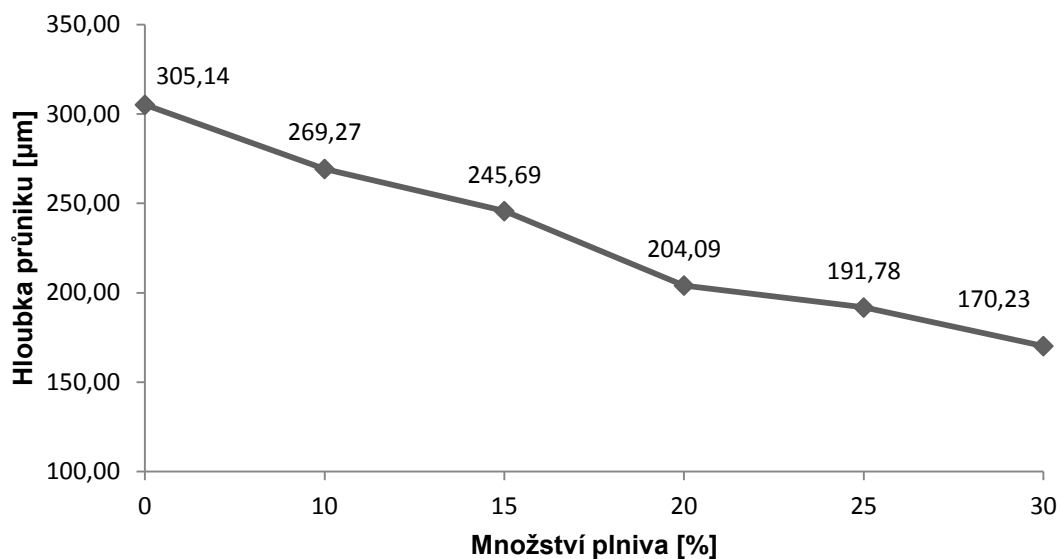
Obr. 18: Průměrné hodnoty vlivu torzního momentu na množství plniva měřené během 2 minut

## 10.2. Stanovení hloubky průniku

Pro zjištění hloubky proniku byla použita metoda fluorescenční mikroskopie. Tato metoda se prokázala jako účinná, jelikož penetrace byla změřitelná. Pro každou záměs s plnivem bylo vytvořeno 5 mikrotomických vzorků dřeva. Průměrná hodnota každého vzorku (ozn. 1 – 5) se sestavovala z 10-ti měření ve fluorescenčním módu mikroskopu.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty průniku lepidla do struktury dřeva s ohledem na množství plniva AGP

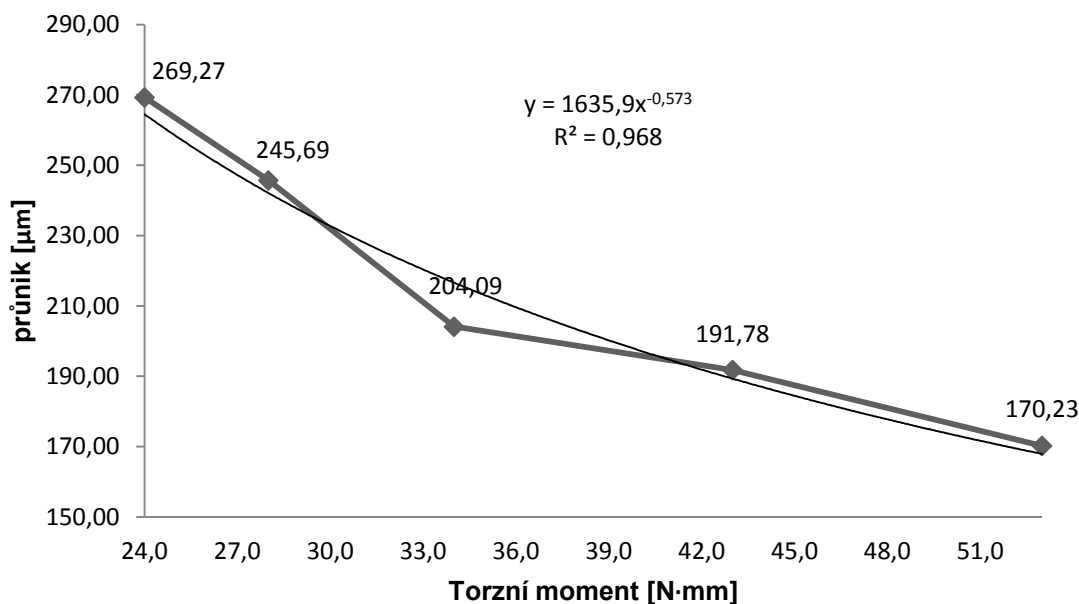
Vzorek	Množství plniva					
	0%	10%	15%	20%	25%	30%
	Průměrné hodnoty hloubky průniku z 10-ti měření [ $\mu\text{m}$ ]					
1	336,01	285,33	225,84	229,81	202,84	180,21
2	275,78	254,87	244,81	212,86	192,85	169,43
3	280,01	287,23	262,84	197,37	185,62	176,83
4	338,03	261,58	238,01	178,53	181,75	170,01
5	295,85	257,33	256,98	201,89	195,85	154,68
<b>Průměr</b>	<b>305,14</b>	<b>269,27</b>	<b>245,69</b>	<b>204,09</b>	<b>191,78</b>	<b>170,23</b>



Obr 19: Průměrné hodnoty hloubky průniku lepidla do struktury dřeva s ohledem na množství plniva AGP

Fluorescenční mikroskopie byla viditelná na mikrotomických řezech vzorků, vybrané fotomikrosnímky jsou doložené na obrázcích 20 až 24. Sledovali jsme zbarvené zaplnění buněčných lumenů adhezivem s luminiscenčním Rhodaminem B. Na snímcích z mikroskopu jsou viditelné černé částice plniva AGP zaplňující matrici v části lepené spáry. Vzhledem k velikosti částic plniva 0 - 0,4 mm nebyl zaznamenán jakýkoliv jejich průnik do lumenů buněk. Přibývání množství plniva v matrici mělo za následek snížení toku adheziva, které neproniklo skrze zrna do hloubky dřeva v plné míře.





Obr 25: Závislost torzního momentu na hloubku průniku adherendu do struktury dřeva

Výsledkem obou zkoušek je vyjádření závislosti torzního momentu na hloubku průniku adheziva do buněčné struktury. Podle grafu je dokázáno, že viskozita způsobí sníženou penetraci. Bylo dosaženo poměrně vysoké hodnoty  $R^2$  koeficientu determinace, která prokazuje vysokou hodnotu závislosti viskozity na penetraci lepidla do dřeva vyjádřené mocninnou funkcí.

Pro porovnání s experimentem, který provedl Grmuša a kol. [21], došlo při použití močovino-formaldehydového (UF) k větší penetraci složek lepidla (až 381,48  $\mu\text{m}$ ) než u našeho zkoušeného EP lepidla (max. penetrace 269,27  $\mu\text{m}$ ). Rozdíl lze spojovat s větší viskozitou epoxidové směsi a jiný typ plniva.

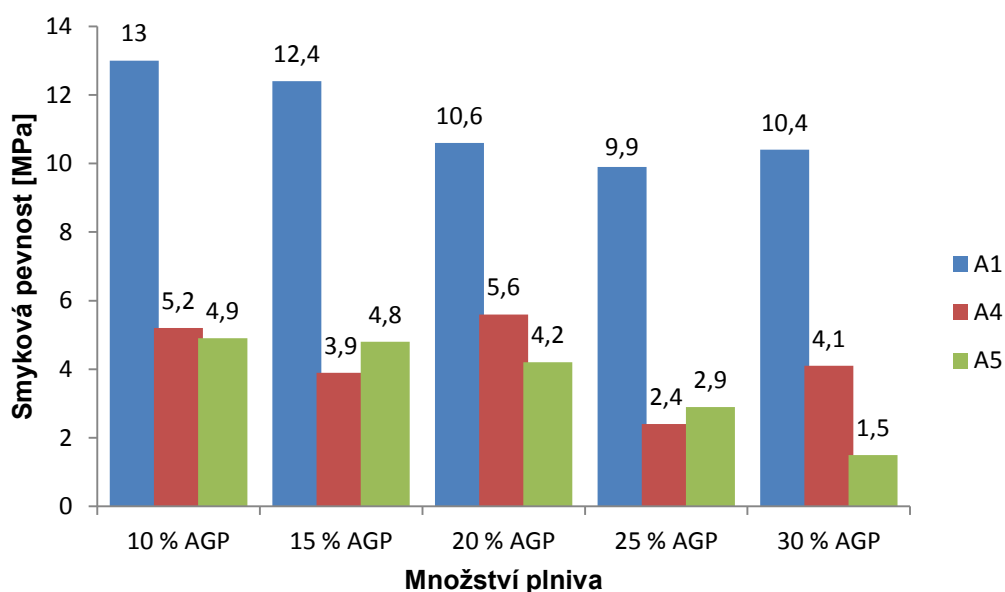
### 10.3. Stanovení podélné smykové pevnosti dřevěných slepenců

Vzorky slepenců byly exponovány dle ČSN EN 302-1 v prostředích A1, A4, A5 a poté podrobeny tahovou zkouškou za stanovení podélné smykové pevnosti. Měření bylo provedeno pro každé plnění a expozici na čtyřech vzorcích a výsledné hodnoty byly zprůměrovány. Výsledné pevnosti jsou uvedeny v obrázku 26.

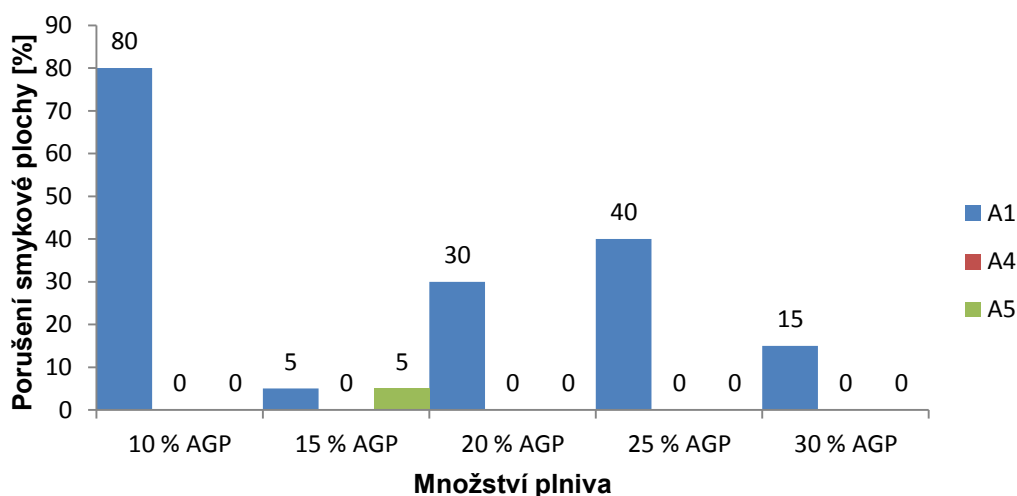
Z grafu je patrné, že nejvyšší hodnoty pevností 13 MPa bylo dosaženo při 10% obsahu AGP expozice A1. Této hodnotě odpovídalo kohézní poškození dřeva na smykové ploše 80 %. Po exponování v prostředí A4 za stejného

množství plniva 10 % byl zaznamenán pokles pevností o 60 % na hodnotu 5 MPa. Obdobné výsledky nastaly také v expozici A5.

Vlivem narůstajícího podílu plniva dochází k pozvolnému poklesu pevností až na hodnotu 1,5 MPa při expozici A5 a obsahu plniva 30 %. Podle výrazného poklesu pevností mezi A1 a expozicemi s hygrotermální zátěží A4, A5 lze vyvodit, že vlivem působení hygrotermálního namáhání dochází k výrazným poklesům adhezivních sil mezi epoxidem a dřevěným adhirendem. Vyšší obsah plniva navíc podporuje snížení této adhezní vazby.



Obr. 26: Průměrná smyková pevnost dřevěných slepenců při různých expozicích



Obr 27: Porušení lepené plochy po zkoušce smykové pevnosti



*Obr. 28: Vzorek s 25 % plniva po expozici A1 (Porušení 40 %)*

*Obr. 29: Vzorek s 10 % plniva po expozici A5 (Porušení 0 %)*

Míra porušení smykové plochy lze pozorovat na obrázcích 28 a 29. Při hygrotermální expozici ve třídách A4 a A5 došlo k narušení adhezivních sil u všech zkušebních vzorků. Ty se projevovalo dosažením naprosté ztráty adheze v těchto třídách, vyjádřené nulovou hodnotou kohezního poškození. Obecně lze říci, že plněné epoxidové lepidlo je málo odolné vůči vlhkostnímu zatížení.

## 11. ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval problematikou kvality penetrace adheziva do struktury dřeva. Cílem bylo popsat princip adheze pomocí nejnovějších teorií. Při procesu lepení dochází k mnoha procesům současně, proto neexistuje unifikovaná teorie popisující celý průběh adheze. Kvalita lepeného spoje je závislá nejen na mechanické vazbě, ale také na chemické, dipólové nebo difundované. V této práci je popsána rešerše metody pomocí fotometru, která potvrdila tuto skutečnost.

Cílem praktické části bakalářské práce bylo provést analýzu viskozity a hloubku průniku lepidla s ohledem na plnění lepidla. Pro experiment byla zvolena dvousložková epoxidová pryskyřice s kaučukovým plnivem. Posuzovalo se pět záměsí lepidla s různým množstvím plniva od 10 % do 30 % z hmotnosti pryskyřice.

Po vyhodnocení torzního momentu bylo stanoveno, že s přidáváním množství plniva se viskozita lepidla exponenciálně zvyšuje. Výsledek pro směs s 10 % plniva byl 24,88 N·mm a pro směs s 30 % byla hodnota 53,47 N·mm. Tyto hodnoty byly vypočítány z měření, které trvalo 2 minuty. Tento jev byl potvrzen i vysokou hodnotou koeficientu determinance 0,9946. Dále si můžeme povšimnout histogramu průběhu záznamu viskozimetrem, který měl charakter zvyšujícího trendu. Z této závislosti lze vyvodit, že se jedná o důsledek vznikající síťové struktury lepidla vlivem zvyšující se teploty a vzniku nových chemických vazeb procesu vytvrzování lepidla.

Rovněž plnění epoxidu plnivem ovlivnilo hloubku průniku lepidla do struktury dřeva. Pro zjištění byla zvolena fluorescenční mikroskopie. U referenční směsi bez přidání kaučuku byla zaznamenána hodnota penetrace 269,27  $\mu\text{m}$  a pro směs s 30 % hodnota 170,23  $\mu\text{m}$ . Výsledek prokázal, že zvyšování množství plniva vede ke snížení hloubky průniku adheziva. Následkem je menší tok plnivových částic a vznik lokálních shluků větších částic kaučuku, které významně ovlivnily hodnotu viskozity a tím i průnik lepidla do struktury dřeva. I přesto bylo dosaženo určité penetrace lepidla při vyšších procentech plnění do struktury dřeva, takže došlo k vytvoření řádné mechanické vazby. Nicméně trvanlivost takto lepených sestav vykazovala velmi sníženou hodnotu u slepenců lepených vyšším procentem

kaučuku. Zkušební vzorky byly zkoumány ve třech exponovaných prostředích. Nejvyšších hodnot se dosáhlo po expozici za laboratorních podmínek (A1). Výrazný pokles pevností nastal po hygrotermálním exponování, kde hodnoty smykových pevností klesly až o 90 %. Tento fakt je důsledkem objemových změn mikročástic, které vedou k rozdílným napjatostním stavům v lepicí spáře.

## 12. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **EBNESAJJAD, S.** *Handbook of adhesives and surface Preparation*. 2nd ed. Norwich : William Andrew, 2008. ISBN 978-0-8155-1533-3.
2. **OSTEN, Miloš.** *Práce s lepidly a tmely*. 2. vydání. místo neznámé : SNTL, 1982. ISBN 80-7169-338-3.
3. **STAMM, A.J.** *Wood and Cellulose Science*. *Ronald Press*. 1964, stránky 248-263.
4. **GARDNER, D. J.** *Adhesion Mechanisms of Durable Wood Adhesive Bonds*. [autor knihy] D. D. Stroke a L. H. Groom. *Characterization of the Cellulosic Cell Wall*. Iowa : Blackwell Publishing Professional, 2006.
5. **BIKERMAN, Jakob J.** Causes of poor adhesion: weak boundary layers. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1967, 59.9, stránky 40-44.
6. **WU, S.** *Polymer Interface and adhesion 1st. ed.* New York : Marcel Dekker, 1982.
7. VSCHT. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze*. [Online] [Citace: 15. Květen 2016.] [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuuka/labcv/labor/res\\_makroskopicka\\_stavba\\_dreva/](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuuka/labcv/labor/res_makroskopicka_stavba_dreva/).
8. **KHESTL, F.** *Vysoká škola Báňská. Zkoušení stavebních hmot a dílců*. [Online] [http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo\\_zk](http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zk).
9. **LIPTÁKOVÁ, E. a SEDLIAČÍK, M.** *Chémia a apliácia pomocných látok v drevárskom priemesele*. Bratislava : Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatury, 1989. str. 520.
10. Učebnice elektronická. *ELUC*. [Online] [Citace: 19. Květen 2016.] [https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/attachments/614/LEPIDLA\\_p\\_loha.doc](https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/attachments/614/LEPIDLA_p_loha.doc).
11. **ŠLEZINGEROVÁ, J. a GANDELOVÁ, G.** *Stavba dřeva*. Brno : MZLU Brno, 2002. ISBN 80-7157-636-0.

12. Veterinární a farmaceutická universita Brno. [Online] 2012. [Citace: 20. Květen 2016.] <http://www.vfu.cz/inovace-bc-a-navmgr/pub-files/realizovane-klicove-aktivity/2012-2013/h2mp/index/vyuziti-a-princip-fluorescencni-mikroskopie2.pdf>.
13. Pedagogická fakulta Masarykovy university. [Online] [Citace: 21. Květen 2016.] <http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/fchlab/fotometr.htm>.
14. **GINDL, W., DESSIPRI, E. a WIMMER, R.** UV-Microscopy of MUF Resin. *Holzforschung*. 2002, 56, stránky 103-107.
15. **FERGUS, B.J. a SCOTT, a kol.** The distribution of lignin in sprucewood as determined by ultraviolet microscopy. *Wood Science and Technology*. 1969, Sv. 3, 2, stránky 117-138.
16. **MANTANIS, G.I., YOUNG, R.A. a ROWELL, R.M.** Swelling of wood. Part II. *Holzforschung*. 1994, Sv. 48, 6, stránky 480-490.
17. **DVOŘÁKOVÁ, M.** *Analýza vlivu celulóзовých vláken v epoxidovém lepidle určeného pro lepení dřevěných nosných prvků*. Brno : VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, 2014.
18. Lexikon dřev. [Online] Mendelova universita v Brně, 2002. [Citace: 5. Květen 2016.] [http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=bk](http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=bk).
19. ACR Czech resins & composites. [Online] 2011. [Citace: 20. Květen 2016.] <http://www.axson.cz/aktuality/epolam-2017.html>.
20. *Schleibinger Testing Systems*. [Online] [Citace: 10. Květen 2016.] [http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%26nbsp%3B:Viskomat\\_NT\\_-\\_Rheometer\\_f.\\_Mortar\\_and\\_Paste](http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Rheometers%26nbsp%3B:Viskomat_NT_-_Rheometer_f._Mortar_and_Paste).
21. G. I. Grnuša. [Online] [Citace: 22. Květen 2016.] <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0353-4537/2008/0353-45370898039G.pdf>.

### 13. SEZNAM NOREM

ČSN EN 12092 Lepidla – Stanovení viskozity

ČSN EN 1067 (66 8602) Lepidla – Posouzení a příprava vzorků před zkoušením

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

### 14. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

FRP	fibre-reinforced plastic
Å	Jednotka Ångström ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ )
CED	Hustota kohezivní energie
EP	Epoxidová pryskyřice
AGP	Active rubber powder
MDI	Methylen bifenyl diisokyanát
MUF	Melamin formaldehydová pryskyřice
DMF	Dimethylformamid
UV	Ultrafialové záření