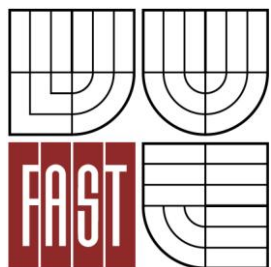




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

PLNĚNÍ EPOXIDOVÝCH LEPIDEL ZVÝŠUJÍCÍ DUKTILITU LEPENÝCH DŘEVĚNÝCH SPOJŮ

MODIFICATION OF EPOXY RESIN EFFECTING DUCTILITY OF WOOD BONDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

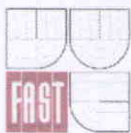
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETRA HUDEČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2016



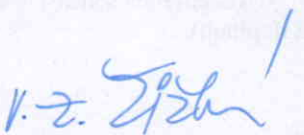
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Petra Hudečková
Název Plnění epoxidových lepidel zvyšující duktilitu
lepených dřevěných spojů
Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
**Datum zadání
bakalářské práce** 30. 11. 2015
**Datum odevzdání
bakalářské práce** 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

- Johnsen, B. B., Kinloch, A. J., Mohammed, R. D., Taylor, A. C., & Sprenger, S. (2007). Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers. *Polymer*(48), 530-541.
- Kim, B. C., Park, S. W., & Lee, D. G. (2008). Fracture toughness of the nano-particle reinforced epoxy composite. *Composite Structures*(86 (1-3)), 69-77.
- Pearson, R. A., & Yee, A. F. (1991). Influence of particle size and particle size distribution on toughening mechanisms in rubber-modified epoxies. *Journal of Materials Science*(26 (14)), 3828-3844

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Pro lepení externích FRP lamel k dřevěným prvkům se nejčastěji používají epoxidová lepidla. Adheze systému je významně ovlivněna vlhkostní expozicí vyvolávající objemové změny dřeva. Jednou z možností zvýšení adheze FRP/dřevo systému je modifikace epoxidového lepidla zvyšující jeho duktilní vlastnosti. Duktilní parametry lepidla jsou dosaženy modifikací epoxidů, nejčastěji pomocí zabudování dispersní látky v matrici. Nejlepších výsledků bylo dosaženo v případě použití modifikace epoxidů kaučukem.

V rámci práce budou v teoretické části popsány způsoby modifikace epoxidových lepidel různými typy částicového plniva a z literární rešerše bude analyzován vliv plnění na výslednou houževnatost epoxidové směsi. Dále bude provedena bližší specifikace experimentálních způsobů zjišťování lomové houževnatosti jak plněných polymerů, tak i lepených dřevěných slepenců. V dílčí experimentální části bude ověřen vybraný způsob plnění epoxidů kaučuky na trvanlivost lepeného dřevěného spoje.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).
- 3.



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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá procesem lepení dřevěných nosných prvků, základními typy lepidel používaných pro dřevěné konstrukce a důležitými požadavky na lepenou spáru dřeva. Dále je v této práci stručně popsána problematika lomové houževnatosti a způsoby plnění epoxidových lepidel kaučuky, termoplasty i jinými plnivy. V experimentální části bylo provedeno vyztužení epoxidové matrice různým množstvím kaučuku. Zpracování směsi probíhalo pomocí ultrazvukového homogenizéru. Následně se na vyrobených epoxidových vzorcích provedla zkouška pevnosti v tahu, výpočet modulu pružnosti a pomocí skenovacího elektronového mikroskopu byla provedena analýza lomové plochy.

Klíčová slova

Epoxidová lepidla, kaučuk, plnivo, dřevěný lepený spoj.

Abstract

This bachelor thesis is focus on a jointing process of wood parts, the basic kinds of adhesives that are used for wood constructions, and also deals with an important demands on a bonded wood joint. Then there is briefly described an issue of fracture toughness and the ways of epoxy adhesives filling, primarily filling with the rubber, the thermoplastics and other fillers. In the experimental part the reinforcing of epoxy matrix with the different quantity of rubber was carried out. The mixture was prepared by an ultrasound homogenizer. Firstly, the tensile strength test with epoxy samples was carried out. Secondly, the Young modulus was calculated and in the last part the fracture surface was analyzed with the scanning electron microscope.

Keywords

Epoxy adhesives, rubber, filler, wood bonds.

Bibliografická citace VŠKP

Petra Hudečková *Plnění epoxidových lepidel zvyšující duktilitu lepených dřevěných spojů*. Brno, 2016. 59 s., 9 s. příl. 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(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26.5.2016

.....
podpis autora
Petra Hudečková

Poděkování:

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc, rady a hlavně za čas, který mi věnoval při zpracování této práce. Mé poděkování také patří rodině a přítelovi za pomoc a podporu během studia.

OBSAH

1	ÚVOD.....	10
2	PROCES LEPENÍ DŘEVĚNÝCH NOSNÝCH PRVKŮ	11
2.1	Parametry ovlivňující proces a způsob vytvrzování lepidel.....	12
2.1.1	Vliv teploty.....	12
2.1.2	Vliv úpravy povrchu dřeva.....	12
2.1.3	Vliv vlhkosti dřevěného adherendu	13
3	LEPIDLA PRO DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE.....	15
3.1	Druhy lepidel pro nosné dřevěné konstrukční prvky	16
3.1.1	Rezorcín–formaldehydová (RF) a fenol–rezorcín–formaldehydová (PRF) pryskyřičná lepidla	16
3.1.2	Fenol–formaldehydová pryskyřičná lepidla pro lepení za horka (PF).....	18
3.1.3	Fenol–formaldehydová pryskyřičná lepidla pro lepení za studena (PF).....	18
3.1.4	Močovino–formaldehydová pryskyřičná lepidla (UF)	19
3.1.5	Melamin–močovino–formaldehydová pryskyřičná lepidla (MUF)	19
3.1.6	Kaseinová lepidla	20
3.1.7	Epoxidová lepidla	20
4	POŽADAVKY NA LEPENOU SPÁRU DŘEVA	23
4.1	Konstrukce lepených spojů	23
4.2	Aplikace lepidla	25
4.3	Fyzikální aspekty	27
4.3.1	Smáčení	27
4.3.2	Viskozita lepidla	29
4.3.3	Stanovení hodnoty pH lepidla	31
4.4	Vliv dřevěného adherendu	32
4.5	Pevnost lepeného spoje	32
4.5.1	Smyková pevnost.....	32
4.5.2	Lomová houževnatost.....	33
5	ZPŮSOBY PLNĚNÍ EPOXIDOVÝCH LEPIDEL	34
5.1	Kaučuky	34
5.2	Termoplasty.....	36
5.3	Celulózová vlákna	36
6	CÍL PRÁCE	37
7	METODIKA PRÁCE	38
7.1	Epoxidové lepidlo	38
7.2	Plnivo.....	39
7.2.1	Elastomer – Kaučuk	39

7.2.2	Organické plnivo – jíl.....	40
7.3	Modifikace epoxidové směsi	41
7.3.1	Epoxidová směs plněná kaučukem	41
7.3.2	Epoxidová směs plněná jílem	42
7.4	Metodika zkoušek.....	43
7.4.1	Stanovení tahových vlastností epoxidu	43
7.4.2	SEM – skenovací elektronový mikroskop	44
8	VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ.....	46
8.1	Vliv různého množství kaučuku v epoxidu	46
8.1.1	Pevnost v tahu	46
8.1.2	Modul pružnosti.....	46
8.1.3	Poměrné prodloužení.....	47
8.1.4	Analýza lomové plochy epoxidového lepidla modifikovaného kaučukem pomocí SEM.....	48
8.2	Vliv různého množství jílu v epoxidu	49
8.2.1	Pevnost v tahu	49
8.2.2	Modul pružnosti.....	50
8.2.3	Poměrné prodloužení.....	51
8.2.4	Analýza lomové plochy epoxidového lepidla modifikovaného organickým plnivem (jílem) pomocí SEM.....	52
9	ZÁVĚR.....	53
10	LITERATURA.....	54
11	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	56
12	SEZNAM TABULEK	58
13	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	59
14	PŘÍLOHY	60

1 ÚVOD

Dřevo je jedním z nejstarších materiálů, které se lidstvo naučilo využívat ke stavbě obydlí, výrobě pracovních nástrojů i jako zdroj energie. I přesto, že je trh stavebních materiálů zaplněn mnoha dalšími zástupci, jako je beton, keramika, cihly atd., se dřevo, nejen jako stavební materiál, nadále vyskytuje a zájem o něj nepolevuje. Tento fakt má jistě hlubší opodstatnění, z čehož plyne, že má význam se s dřevěnými materiály a jejich aplikacemi dále zabývat a studovat je.

Dřevo je jedno z mála materiálů, které na svou výrobu nepotřebuje primární energii dodanou lidskou rukou. Přirozenou vlastností je jeho dobrá tepelná vodivost, nízká teplotní roztažnost, schopnost tlumit vibrace, snadná tvarovatelnost a spojovatelnost. Z ekologického hlediska dřevozpracující průmysl tolik nezatěžuje životní prostředí. Mezi nevýhody dřeva patří možnost napadení biotickými činiteli, bobtnání a sesychání dřeva vlivem vlhkosti, nerovnoměrná struktura, špatný vliv na oheň a také jeho anizotropie (dřevo má různé vlastnosti v různých směrech).

Pro spojování dřevěných konstrukcí lze použít ozuby, svorníky, vruty, hmoždíky, hřebíky, kolíky a spoustu dalších mechanických spojů. Mimo jiné lze také aplikovat lepidla. Na trhu se objevuje velká škála lepidel. Nedílnou součástí studia dřevěných konstrukcí je problematika epoxidových lepidel, používaných ke spojování dřevěných prvků převážně s vnějšími FRP systémy. Pro lepení dřevěných sestav se využívají lepidla na bázi formaldehydu.

Epoxidová lepidla se uplatňují v mnoha průmyslových oblastech a míra jejich použití se neustále rozšiřuje. Jejich použití je například v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, v letectví apod. Z důvodu zvýšených požadavků na pevnost spojů se hledají různé příměsi a plniva pro zlepšení vlastností epoxidů. Tyto látky se používají také za účelem snížení nákladů na lepení.

Tato bakalářská práce se zabývá úvodem do teorie lepení, základním přehledem lepidel používaných pro dřevěné nosné konstrukční prvky, podstatnými požadavky na lepenou spáru dřeva, lomovou houževnatostí lepeného spoje a především způsoby plnění epoxidových lepidel.

2 PROCES LEPENÍ DŘEVĚNÝCH NOSNÝCH PRVKŮ

Lepidla v oblasti dřevěných nosných konstrukcí se užívají ke spojování dvou či více dřevěných prvků. Po spojení pak působí soustava ze statického hlediska jako celek. Primární funkcí lepidla je vyplnění spár a vytvoření adhezního spojení mezi spojovanými prvky. Toto spojení tvoří pevný celek stejně jako samotné kohezní síly působící uvnitř prvků. Je třeba brát ohled i na dostatečnou pevnost a trvanlivost vrstvy lepidla, které jsou v dané třídě použití požadovány s ohledem na dobu životnosti celé konstrukce.

Na rozhraní lepidla se dřevem působí vazebné síly. V převážné většině případů se jedná o vazby sekundární, mezi které řadíme vazbu Van der Waalsovu a vodíkový můstek. U některých lepidel se však můžeme setkat i se silnějšími vazbami, jako je např. vazba kovalentní, při které mezi dvěma molekulami dochází ke sdílení elektronového páru.

Proces lepení sestává ze dvou stupňů. Tyto stupně jsou dle EC 5 následující:

- **aplikace** tekutého lepidla, které smáčí povrchy všech spojovaných částí tak, že ve styčných plochách vznikají přitažlivé síly mezi lepidlem a molekulami dřeva;
- **fázový přechod** tekutého lepidla, vyplňujícího spáry mezi spojovanými částmi, do pevné fáze charakteristické dostatečnou pevností a trvanlivostí během doby životnosti konstrukce.

Konečnou fází procesu lepení je tzv. **vytvrzování**. To má za následek vytvoření tuhého filmu na rozhraní adherend/lepidlo. Lepidlo po aplikaci na lepenou plochu mění své skupenství ze stavu kapalného do stavu tuhého. Pro jednotlivé skupiny lepidel se průběh vytvrzování může lišit. Jak uvádí EC 5, vytvrzování může být způsobeno jedním z následujících procesů:

- **fyzikálním procesem**
 - přeměna roztoku nebo tuhnutí taveniny;
 - termoplastická lepidla (polyvinylacetát – PVAc);
 - tavná lepidla (nanášejí se v tekuté formě a ve spoji tuhnou ochlazením na normální teplotu);
- **chemickým procesem**
 - molekuly lepidla vzájemně reagují, vytváří kovalentní vazby a polymerní zesílení;
 - polyuretanová lepidla a lepidla z epoxidových pryskyřic, reaktivní lepidla;

- **kombinací výše zmíněných** – přeměna roztoku a chemické reakce;
 - močovinová, melaminová, fenolická a rezorcín–formaldehydová lepidla.

2.1 Parametry ovlivňující proces a způsob vytvrzování lepidel

2.1.1 Vliv teploty

Na vytvrzování a tedy na tuhnutí lepidel ve spoji má významný vliv vytvrzovací teplota. Rozlišujeme tři kritéria rozdělení technologií lepení podle teploty:

- **za normální teploty** – teplota do 30 °C;
- **za tepla** – teplota od 30 do 100 °C;
- **za horka** – teplota nad 100 °C.

Na volbu vytvrzovací teploty má vliv vzájemné působení několika činitelů. Mezi tyto činitele řadíme tepelnou odolnost spojovaného materiálu, délkovou roztažnost teplem, tepelnou odolnost použitého lepidla, vliv teploty na rychlost vytvrzení lepidla a na vsáknutí rozpouštědla do lepeného materiálu a jiné. [1]

Nejvýraznější vliv teploty na režim vytvrzování byl zjištěn u reaktivních lepidel. U této skupiny adheziv s rostoucí teplotou rychlost vytvrzení exponenciálně roste, ale naopak za chladu dochází ke zpomalování procesu vytvrzování, v krajním případě tento proces vůbec neproběhne.

2.1.2 Vliv úpravy povrchu dřeva

Pro docílení maximální pevnosti spoje je předpříprava lepeného povrchu velmi důležitou součástí procesu lepení dřevěných nosných prvků. Do úpravy povrchu lze zahrnout fyzikální, mechanické i chemické úkony. Jedná se o vyrovnávání hrubých nerovností povrchu, odstraňování nečistot a korozních zplodin, ale i vnitřního pnutí a zvýšení adhezních vlastností. V případě nasákavých materiálů patří k těmto úkonům i úprava jejich vlhkosti. Není podmínkou, že všechny druhy povrchových úprav se musí provádět současně.

Tzv. nouzovou povrchovou úpravou se rozumí pouze broušení či odmaštění adherendu před aplikací lepidla. Tou je však možné zajistit pouze zlomek dosažitelných hodnot mechanické pevnosti spoje. Takové úpravy se provádí u adherendů s dobrými adhezními vlastnostmi, např. u kovů.

Mechanické opracování kontaktních ploch závisí na prostředí, kde lepený spoj zhotovujeme. V domácích podmínkách se provádí ručním hoblováním, pilováním nebo obrušováním ocelovým kartáčem nebo brusnými papíry. V průmyslu se používají stroje pro frézování, hoblování, soustružení, obrušování mezi válci nebo otryskávání.

Pro zamezení opálení dřevěného povrchu nebo vnitřního pnutí v plastových materiálech při těchto úpravách musí být materiál tepelně a mechanicky co nejméně namáhán. Proto se používají ostré nástroje a vysoké otáčky při malých posuvech za současného chlazení vzruchem nebo chladicí kapalinou.

Při **broušení** či **otryskávání** povrchu se nesmí adherend ve velké míře rozedřít, aby hluboké rýhy nezamezily dobrému smáčení mikro–povrchu. Jako brusné prostředky k otryskávání se používají křemičitý písek nebo elektrokorund. Jejich zrnitost by měla být maximálně 0,5 až 1,0 mm. Pro materiály s hrubší strukturou je možno použít ocelové broky. Těmi se ale povrch spíše brousí nebo roztloukává a to má za příčinu vznik povrchových nerovností. Nejefektivnější přístroje k otryskávání povrchů určených k lepení se osvědčily ty se zpětným nasáváním odstraněných zbytků povrchu i otryskaného materiálu.

Po dokončení opracovávání je potřeba plochy vždy perfektně odmastit a očistit od zanesených nástrojů.

Odmašťování se může provádět dvěma způsoby:

- rozpouštěním mastných látek vhodnými rozpouštědly s rozsáhlou účinností;
- převedením mastných nečistot do stabilizované emulze pomocí roztoků anorganických solí.

Snažíme se používat kapaliny nehořlavé, zdravotně nezávadné, stálé za vyšších teplot a snadno regenerovatelné.

Z teorie napsané výše je zřejmé, že čím je větší čistota povrchu lepeného adherendu, tím vyšší je pronik lepidla do jeho struktury a tedy i větší mechanická pevnost výsledného spoje. [2]

2.1.3 Vliv vlhkosti dřevěného adherendu

Vlhkostí dřeva se rozumí podíl množství kapaliny, která zaujímá objem v dřevěné hmotě k celkové hmotnosti dřeva. Voda ve dřevě se obecně rozděluje na vodu volnou (kapilární, jež se vyskytuje v lumenech buněk) a na vodu hygroskopicky vázanou v buněčných stěnách. Jestliže přijme určitá dřevina v čerstvém stavu vodu kapilární, může se

celkový obsah vlhkosti pohybovat až okolo 80 – 200 % suché váhy dřeva. Ale i když se volná voda odstraní z buněk sušením, v buněčných stěnách zůstane průměrně 30 % vody. Tento stav označujeme jako mez nasycení buněčných stěn a její hodnota se může měnit v závislosti na druhu stromu, teplotě a tlaku. Při snížení relativní vlhkosti vzduchu dřevo vyschne pod bod nasycení vláken a nastane jeho smršťování. Naopak při zvýšení relativní vlhkosti okolního vzduchu dřevo přijme vlhkost a nastane jeho bobtnání.

Nejvhodnější vlhkost dřeva pro lepení je 8 ± 2 %, pro polyuretanová lepidla je hodnota vlhkosti dřeva vyšší (až 15 %), neboť se vlhkost podílí na procesu vytvrzování lepidla.

Značná část lepidel se vyskytuje ve formě vodného roztoku, přičemž voda, která je v tomto roztoku obsažená, následně difunduje do dřevěného materiálu. Vzhledem k tomu, že dřevo samotné může absorbovat jen určitý podíl vody, zbytek vody tak zůstává v lepené spáře, což má za následek zpomalení procesu vytvrzení lepidla.

Na proces vytvrzování má vliv vlhkost vzduchu. Relativní vlhkost vzduchu se ideálně pohybuje v rozmezí 40 – 60 %, klesnout by však neměla pod 30 %. Negativní účinky má i příliš vysoká vlhkost vzduchu (nad 90 %). V takovém případě je vytvrzení urychleno a pevnost lepidla může být výrazně nižší. [3]

3 LEPIDLA PRO DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE

Podle evropské normy ČSN EN 301 „Fenolická a aminová lepidla pro nosné díly dřevěných konstrukcí – Klasifikace a technické požadavky“ se fenolická a aminová lepidla rozdělují podle vhodnosti použití v různých klimatických podmínkách na:

- **lepidla typu I** – jsou trvanlivá při libovolné venkovní expozici a teplotách nad 50 °C;
- **lepidla typu II** – lze využít ve větraných a vytápěných budovách, venkovním prostředí chráněném proti povětrnosti, při krátkodobém působení povětrnosti a při teplotách nepřesahujících hodnotu 50 °C.

Tyto dva typy lepidel se dále podle konečného použití (dle ČSN EN 301) dělí na:

- **univerzální lepidla (GP)¹** – pro lepení spár mezi lamelami a pro zubovité spoje;
- **lepidla pro rohové spoje (FJ)²** – pouze pro zubovité spojování lamel a pro konstrukční dřevo;
- **lepidla pro vyplňování spár (GF)³** – pro lepení k sobě rovnoběžných vláken, pro velké zubovité spoje.

Tabulka č. 1: Vhodnost současných lepidel pro nosné dřevěné prvky dle EN 301

<i>Podmínky prostředí</i>	RF / PRF	PF (za horka)	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 vzduchu	+	+	+	+	+
Barva lepených spár	Tmavá	Tmavá	Světlá	Světlá	Světlá
Typ podle EN	301 – 1	–	301 – I/II	301 – I/II	–

Legenda symbolů: + vhodné; (+) některé druhy vhodné; x nevhodné; – existujícími normami EN neupraveno.

¹ v anglické literatuře pod označením *general-purpose adhesive*

² v anglické literatuře pod označením *finger jointing adhesive*

³ v anglické literatuře pod označením *gap filling adhesive*

Tabulka č. 2: Klasifikační třídy lepidel podle EN 301

Typ lepidla podle EN 301	Použití	Max. zkušební teplota [°C]	Max. tloušťka vrstvy lepidla [mm]		Klasifikační třída
			Standard.	Obvyklá	
I 70 GP 0,6M	Pro všeobecné použití	70	1,0	0,6	1,2,3
I 70 GP 0,3S		70	1,0	0,3	1,2,3
I 90 GF 1,5M	Pro vyplňování pórů	90	2,0	1,5	1,2,3
I 90 GF 0,6M	Pro všeobecné použití	90	1,0	0,6	1,2,3
I 90 GF 0,3S		90	1,0	0,3	1,2,3
I 90 FJ 0,1M	Pro zubovitý spoj	90	0,3	0,1	1,2,3
I 90 FJ 0,1S		90	0,3	0,1	1,2,3
I 70 FJ 0,1M	Pro zubovitý spoj	70	0,3	0,1	1,2,3
I 70 FJ 0,1S		70	0,3	0,1	1,2,3
II 50 GP 0,6M	Pro všeobecné použití	50	1,0	0,6	1
II 50 GP 0,3S		50	1,0	0,3	1
II 50 FJ 0,1M	Pro zubovitý spoj	50	0,3	0,1	1
II 50 FJ 0,1S		50	0,3	0,1	1

Legenda značek:

- I, II Typ použitého lepidla, dle EN 301;
- GP Univerzální lepidla;
- FJ Lepidla pro zubovité spoje;
- GF Lepidla pro vyplňování pórů;
- M Lepidla pro všeobecné použití;
- S Lepidla a tvrdidla pro odlišné aplikace.

3.1 Druhy lepidel pro nosné dřevěné konstrukční prvky

3.1.1 Rezorcín–formaldehydová (RF) a fenol–rezorcín–formaldehydová (PRF) pryskyřičná lepidla

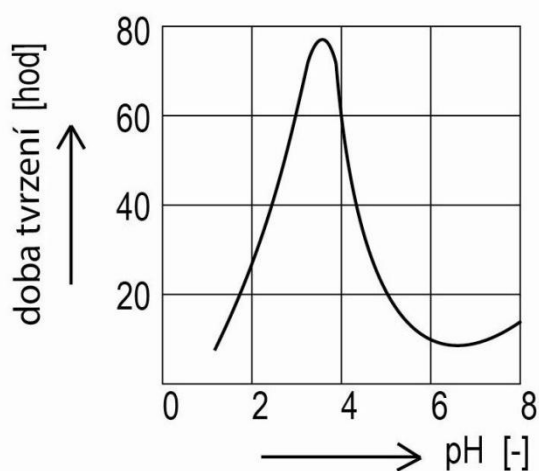
Tato lepidla patří do skupiny nejkvalitnějších montážních lepidel na dřevo. Podle EN 301 je to skupina lepidel typu I. Do této skupiny se řadí, protože vykazují schopnost vytvrzení za normální teploty v neutrálním prostředí, vysoké pevnosti klišních spojů a také odolávají vůči působení studené i vroucí vody, povětrnostním vlivům a také slané vodě.

Při reakci rezorcínu s formaldehydem vzniká čistá rezorcínová pryskyřice. Aby se ukončil proces tuhnutí, přidá se do tekutého lepidla tvrdidlo s obsahem formaldehydu. Teplota a hodnota pH má zásadní vliv na rychlost vytvrzení rezorcínolových lepidel. Ideálně se hodnota pH pohybuje kolem 7 a teplota kolem 15 až 20 °C. Vliv hodnoty pH na dobu

vytvrzení můžeme vidět na obrázku 1. Dále můžeme vlastnosti těchto lepidel využít pro vytvrzování vysokofrekvenčním ohřevem.

Tabulka č. 3: Rychlost vytvrzení rezorcín–formaldehydové pryskyřice v závislosti na hodnotě pH a na teplotě [1]

Hodnota pH	Doba vytvrzení [min]	
	při 20 °C	při 60 °C
6,51	60	4,30
6,9	40	3,30
7,11	20	2,45



Obrázek 1: Vliv hodnoty pH na reaktivitu rezorcín–formaldehydových lepidel [1]

Tvrdidla na bázi formaldehydu obsahují navíc látky, které lepidlu zlepšují vlastnosti pro vyplnění spáry. Mezi tyto látky se řadí chemicky neaktivní plnidla různého druhu. Z důvodu vysoké ceny rezorcínové pryskyřice mnohdy dochází k jejímu částečnému nahrazování látkami s obdobnými vlastnostmi jako je například fenol.

Použití rezorcínolových lepidel se uplatní při výrobě lepeného lamelového dřeva, velkých zubovitých spojů, spojů se styčnickovými deskami, ale především k montážnímu lepení, kdy je namáhaný klišní spoj vystaven působení povětrnostních vlivů, vyšší vlhkosti apod. Široká možnost použití tohoto druhu lepidla je díky jeho chemické neutralitě. To znamená, že lepidlo není ani kyselé ani alkalické a nepoškozuje proto dřevo ani kovy. Lepidla a tedy i spáry mezi spojovanými prvky mají tmavohnědou barvu. Jak udává EC 5, dovolená tloušťka lepených spár je u speciálních lepidel, které vyplňují spáry 2 mm a u běžných lepidel 1 mm. [1]

3.1.2 Fenol–formaldehydová pryskyřičná lepidla pro lepení za horka (PF)

Podle EN 301 tato lepidla nemohou být klasifikována, ale vyhovují nejnáročnějším požadavkům. Mezi základní složky pro přípravu PF lepidel patří syntetické fenoly a formaldehyd. Jejich výroba spočívá v reakci fenolu s formaldehydem v alkalickém prostředí, při zvýšené teplotě. Tato reakce je ukončena ochlazením. Molární poměr fenolu a formaldehydu se pohybuje mezi 1 : 1,1 až 1 : 2, popřípadě i výše. [1]

Teplota pro vytvrzení PF pryskyřičných lepidel tvrditelných za horka se pohybuje v rozmezí od 110 do 140 °C. V lepidle jsou vždy obsaženy volné, nezreagované složky fenolu a formaldehydu, kterým je třeba při zpracování věnovat pozornost z důvodu jejich toxických účinků. Množství těchto složek závisí na složení a výrobním postupu a podíl fenolu může činit až 10 % a podíl formaldehydu až 5 %.

Na trhu je tento druh lepidel dostupný buď v tekutém stavu, v práškovitém stavu nebo jako lepicí film. Nejčastěji se používá ve výrobě překližek, třískových desek, tvrzeného dřeva a podobně. Barva lepených spár je také tmavá stejně jako u RF a PRF lepidel. [1]

3.1.3 Fenol–formaldehydová pryskyřičná lepidla pro lepení za studena (PF)

Klasifikace PF lepidel pro lepení za studena je podle EN 301. Nicméně na základě zkušebního postupu podle EN 302, část 3 pro stanovení vlivu poškození dřevěných vláken kyselinou musí být pravděpodobně vyloučena. Lepené spoje s použitím těchto lepidel mají vynikající vlastnosti, mezi které patří především pružnost, odolnost proti studené i vroucí vodě, mikroorganismům a většině rozpouštědel.

Kyselé prostředí je nutnou podmínkou pro vytvrzování PF lepidel při pokojové teplotě. Použití silných kyselých tvrdidel (fenolsulfonové nebo p–toluensulfonové kyseliny) se záměrně užívá pro snížení pH fenol–formaldehydového resolu na hodnotu, při které za normální teploty dojde k vytvrzení lepidla. Aby proces tvrzení proběhl dostatečně rychle, musí být hodnota pH 1 nebo menší. Lepidlo musí být rozpuštěno v alkoholu, protože ve vodorozpustné formě by kyselina pryskyřici vysrážela.

Používají se jako montážní lepidla na dřevo v případě, že je klizní spoj vystaven působení vlhkosti nebo povětrnostním vlivům. U některých budov, kde bylo použito toto lepidlo, došlo o mnoho let později k poruchám, za jejichž příčinu lze považovat poškození kyselinou. Proto se nemají současná PF lepidla používat pro lepení nosných dřevěných prvků za studena. [1]

3.1.4 Močovino–formaldehydová pryskyřičná lepidla (UF)

UF pro nosné dřevěné konstrukční prvky patří do skupiny nejrozšířenějších a nejpoužívanějších lepidel na dřevo a podle EN 301 jsou zaříděna jako typ lepidel II. Výhodou těchto lepidel je poměrně krátká doba vytvrzování v rozmezí teplot 15 – 150 °C, použití ve formě vodných roztoků, bezbarvost, částečná vodovzdornost i jejich nízká cena. Mezi největší nevýhody UF lepidel patří uvolňování formaldehydu, obsaženého v lepidle už z procesu výroby.

Močovino–formaldehydová pryskyřičná lepidla se připravují reakcí močoviny s formaldehydem v alkalickém prostředí při teplotě 90 – 95 °C. Molární poměry těchto složek se pohybují v rozmezí 1 : 1,4 až 1 : 2,3. Avšak nejpoužívanější molární poměr je 1 : 2. Pro rychlejší průběh reakce se použije kyselina nebo větší přívod tepla. Ukončení reakce probíhá ochlazením a neutralizací na vhodném stupni. Přidáním tvrdidla (chloridu amonného nebo citranu amonného), které odebírá kyselinu, se proces reakce obnoví. Reaktivita, tj. rychlost vytvrzování může být přizpůsobena výrobní technologii přípravy lepidel. Vytvrzování však probíhá při teplotách nad 10 °C.

UF lepidla jsou na trhu k dostání v tekuté formě nebo jako prášek (někdy s přidáním tvrdidlem) a jsou velmi mnohostranně použitelná. V tekuté formě jsou čiré, někdy až bíle zakalené barvy a v prášku jsou bílá. Proto mají lepené spoje s použitím tohoto lepidla světlou barvu.

Pro nosné účely se užívají pouze speciální druhy UF lepidel pro lepení za studena, která nesmí obsahovat příliš kyselé složení a musí se k nim přidávat plnidla. Bez přidání plnidel se lepené spoje, které jsou tlustší než 0,1 mm, bez vnějšího zatížení rozevírají. [1]

3.1.5 Melamin–močovino–formaldehydová pryskyřičná lepidla (MUF)

Klasifikace MUF lepidel pro lepení za studena je podle EN 301. Ta, která vykazují podobné vlastnosti jako UF lepidla, jsou zaříděna jako typ II. MUF lepidla odolná proti vodě splňují požadavky pro typ I. Pro zlepšení voděodolných vlastností obsahují některá lepidla rezorcín a ta se používají například pro stavbu lodí.

Tato lepidla mají podobnou strukturu jako močovino–formaldehydová lepidla. Liší se tím, že u MUF lepidel je část močoviny nahrazena melaminem z důvodu zvýšení odolnosti proti vodě a povětrnosti. Jejich vytvrzování probíhá při teplotách 90 až 110 °C a to bez přídavku tvrdidla.

Používají se pro lisování za horka a pro lepení za studena nebo za tepla lepeného lamelového dřeva a zubovitých spojů. Lepené spoje mají také světlou barvu. [1]

3.1.6 Kaseinová lepidla

Kaseinová lepidla nevyhovují požadavkům normy EN 301. Nicméně norma EN pro kaseinová lepidla je připravována. Je to pravděpodobně nejstarší typ průmyslově vyráběných lepidel a používala se výhradně při výrobě lepeného lamelového dřeva již před rokem 1920.

Základní složkou těchto lepidel je mléčná bílkovina kasein. Lepidlo je k dostání ve formě prášku, který se skládá z kaseinu a různých anorganických solí. Po smíchání prášku s vodou vzniká řada chemických procesů a přibližně po 15 minutách se kasein rozpustí na kaseinát sodný. Následně po 4 až 8 hodinách proběhne přeměna kaseinu sodného na kaseinát vápenatý, který je prakticky nerozpustný ve vodě. Tento proces se nazývá vytvrzování.

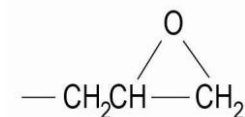
Lepené spáry s použitím kaseinového lepidla mají téměř světlou barvu. Oproti UF lepidlům více odolávají proti současnému namáhání teplem a vysokou relativní vlhkostí vzduchu, ale méně odolávají proti vodě. Jejich nejlepší použití je pro konstrukce uvnitř budov nebo pod střechou ve venkovním prostředí. [1]

3.1.7 Epoxidová lepidla

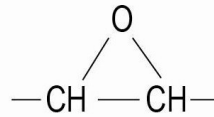
Průmyslová výroba epoxidových pryskyřic je u nás už od roku 1954 a v současné době je na trhu přes dvacet pět druhů těchto pryskyřic.

Epoxidové pryskyřice jsou molekuly, které obsahují více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Tato skupina je velmi reaktivní. Na velikosti reaktivity závisí použití těchto pryskyřic jako lepidel, zalévacích a lisovacích hmot, lakařských pryskyřic a laminátů [4]. Dva nejdůležitější druhy epoxidových pryskyřic jsou [5]:

- druhy, které obsahují **glycidyllové** (2,3-epoxypropylové) **skupiny** – vyrábí se reakcí epichlorhydrinu s vhodnými surovinami;
- druhy, které obsahují **epoxidové skupiny** – vyrábí se epoxidací nenasycených sloučenin.

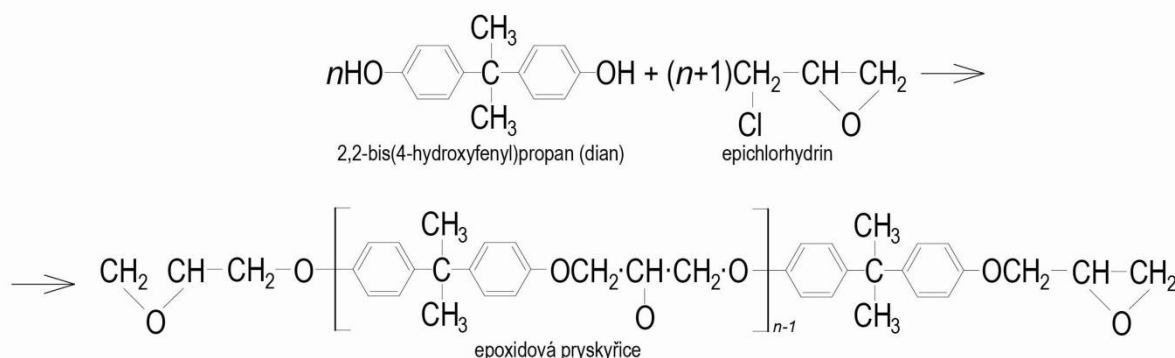


Obrázek 2: Druhy epoxidových pryskyřic
obsahující glycidové skupiny



Obrázek 3: Druhy epoxidových pryskyřic
obsahujících epoxidové skupiny

Základními surovinami pro vytvoření epoxidových pryskyřic jsou technické glycidylethery 2,2-bis(4-hydroxyfenyl) propanu (bisfenolu A nebo dianu), dichlorhydrinu a epichlorhydrinu [4].



Obrázek 4: Schéma přípravy epoxidových pryskyřic [1]

Vyrábí se alkalickou kondenzací dianu s hydroxylovou skupinou fenolu a epihalogenhydrinu, nejvíce však s epichlorhydrinem. [1]

Bez vytvrzení jsou lepidla ve stavu pevných nebo viskózně kapalných látek. Pevná lepidla se používají za zvýšené teploty, kdy se pryskyřice roztaví. Kapalná lepidla obsahují buď reaktivní rozpouštědla, nebo neobsahují rozpouštědla vůbec. Nevytvrzené epoxidové pryskyřice mají schopnost rozpouštět se v aromatických nebo chlorovaných uhlovodících, ketonech, esterech a vyšších alkoholech.

Pro získání dostatečné přilnavosti na kovy, sklo, keramiku a dřevo se epoxidové pryskyřice tvrdí. **Vytvrzování** epoxidových lepidel probíhá při normálních teplotách až po teploty do 200 °C. S vyšší teplotou se zkracuje doba vytvrzení, je dosaženo vyšších pevností a větší odolnosti klízního spoje. Při vytvrzování se prostřednictvím chemických reakcí převádějí nízkomolekulární, rozpustné a tavitelné epoxidové monomery a oligomery na netavitelné a nerozpustné polymery s většinou trojrozměrnou strukturou. Během tohoto procesu dochází k velice malému smrštění. Druh použitého tvrdidla epoxidových pryskyřic

závisí na způsobu zpracování epoxidové pryskyřice, na jejím typu a na požadovaných vlastnostech pryskyřice ve vytvrzeném stavu. Lepidla ve vytvrzeném stavu tvoří tvrdé, nerozpustné a netavitelné spoje.

Epoxidová lepidla se většinou aplikují pouze na jednu stranu lepeného adherendu v tloušťce od 0,1 mm. Pro dostatečnou pevnost spoje se fixuje minimálním tlakem od 0,2 MPa. [1]

Jejich kvalita je dána dobrou schopností pro vyplnění spáry a vykazují dobré pevnosti i trvanlivost. Také mají ve srovnání s lepidly MUF a PRF nejlepší odolnost proti povětrnosti. Mezi další příznivé vlastnosti epoxidových pryskyřic patří jejich použitelnost v poměrně široké oblasti teplot, mají nejlepší mechanické a zejména elektroizolační vlastnosti, vysokou odolnost vůči vodě, roztokům kyselin, alkálií a dokonce i některým rozpouštědlům.

Pryskyřice jsou za normální teploty takřka neomezeně skladovatelné a jejich barva je bezbarvá nebo nažloutlá.

Používají se zejména jako lepidla pro spojování různých materiálů, zvláště k lepení skla, keramiky, kovů, vrstvených hmot, skelných laminátů apod. Dají se ovšem přizpůsobit účelu použití a některé druhy jsou vhodné i pro lepení dřeva. To však pouze ve speciálních případech z důvodu vysoké ceny epoxidových lepidel a jejich vlastností při používání. Tyto speciální případy použití se týkají například při stavbě dřevěných člunů, při sanaci trhlin u lepených lamelových nosníků, při sanaci dřeva poškozeného hnilobou nebo jiným způsobem, při lepení dřeva s kovy, plasty, gumou apod. nebo při vlepování kovových prutů.

Z důvodu snížení nákladů na lepení se používá plnění epoxidových lepidel. Způsoby plnění epoxidových lepidel je uvedeno v kapitole 5. Tato lepidla však nejsou vhodná pro lepení termoplastických hmot, jako je například polyetylen, polystyren, polypropylen a dalších.[1]

4 POŽADAVKY NA LEPENOU SPÁRU DŘEVA

Proces lepení chápeme jako spojování dvou a více předmětů danou látkou, založené na přilnavosti jednotlivých povrchů. Síla, která vykazuje tuto soudržnost, se nazývá **adheze**. Ta se vyžaduje jak při lepení, tak i u řady jiných technických procesů, jako například při utěšňování, při povrchových úpravách a podobně. Předměty, které jsou spojovány, nazýváme **adherendy** či substráty a použité lepidlo **adhezivem**. Tyto materiály se obvykle liší svým složením. Lepidla jsou při aplikaci na povrch adherendu ve stavu kapalném, resp. plastickém, smáčejí dokonale jeho povrch, mají k němu dobrou adhezi a následně mění své skupenství v pevné. Spojováním pomocí lepidel vznikají kombinace různých materiálů.

Koheze značí vnitřní soudržnost molekul lepidla a je jedním z důležitých parametrů pro dostatečnou pevnost klizního spoje, stejně jako přilnavost lepidla na povrch adherendu.

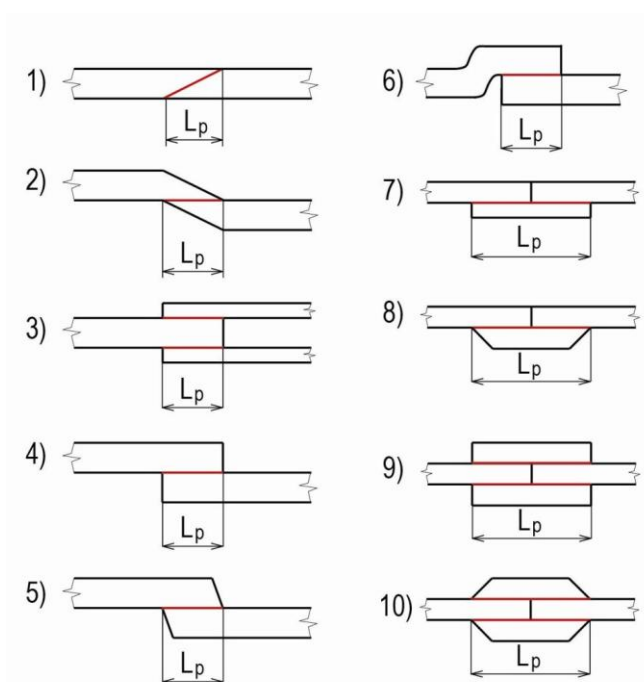
Lepidla používaná pro montáž stavebních a nábytkářských sestav mají obvykle dlouhodobé použití a jsou zdravotně nezávadná. Lepidla používaná v nábytkářství jsou světle zbarvená, s nízkou viskozitou a jsou odolná proti vlhkosti. Naopak lepidla používaná ve stavebnictví jsou tmavé barvy, mají obecně vysokou viskozitu a nejsou odolná proti vlhkosti, a proto potřebují dostatečnou flexibilitu. [1] [6]

4.1 Konstrukce lepených spojů

Při lepení tuhých materiálů nesmíme opomenout konstrukční úpravu spoje, což je jeho důležitou součástí. V případě jejího výběru bychom měli dodržovat tyto zásady [1]:

- konstrukce klizního spoje má být taková, aby jeho zatěžování bylo převážně ve smyku a v tahu a pouze v minimální míře v odlupování;
- konstrukcí spoje je nutno získat dostatečně velkou lepenou plochu;
- mechanické namáhání lepené části musí být rovnoměrně rozloženo a nesmí být soustředěováno v místě spoje;
- lepené plochy by měly být co nejjednodušší, lepení by mělo být realizované v jedné operaci a nemělo by vyžadovat dodatečnou úpravu.

V případě slepování dřeva a výrobků ze dřeva se používají zejména spoje celoplošné, čepové, zubové, na pero a drážku, kolíkové a lamelové. Nejčastěji se však používají spoje celoplošné, protože je to nejjednodušší typ spoje.



Obrázek 5: Konstrukční typy plochých spojů [1]: **1** – spoj tupý zkosený; **2** – spoj jednoduše přeplátovaný zkosený; **3** – spoj dvojité přeplátovaný; **4** – spoj jednoduše přeplátovaný; **5** – spoj jednoduše přeplátovaný upravený; **6** – spoj lemový; **7** – spoj s jednou příložkou; **8** – spoj s jednou upravenou příložkou; **9** – spoj se dvěma příložkami; **10** – spoj se dvěma upravenými příložkami; **L_p** – délka přeplátování.

Tabulka č. 4: Efektivita základních typů plochých spojů [1]

Typ spoje	Pevnost ve smyku při délce přeplátování [%]		Únosnost při délce přeplátování [%]	
	10 mm	20 mm	10 mm	20 mm
Tupý zkosený	100	100	100	100
Jednoduše přeplátovaný	54	32	50	64
Dvojité přeplátovaný	79	44	70	86
Jednoduše přeplátovaný zkosený	67	56	61	100

V případech použití materiálů objemově nestabilních, projevujících se na změnu vlhkosti prostředí změnou svého objemu nabobtnáním nebo smrštěním nebo materiálů s rozdílnou délkovou roztažností teplem, je u celoplošných spojů nezbytné dodržovat materiálovou stejnorodost celku. Jestliže nastane tento případ, musí se provést povrchové

úpravy po obou stranách olepovaných dílců stejným materiálem, ve shodném směru a s použitím stejného lepidla. Nedodrží-li se tyto požadavky, vznikne pnutí v lepené části a následně deformace lepeného celku.

Pevnost plochých spojů je závislá na délce přeplátování a na tuhosti spojovaných materiálů. Čím větší je přeplátování i tuhost, tím větší je pevnost spoje.

Minimální délka jednoduchého asymetrického přeplátování lepených částí se vypočítá dle vzorce [1]:

$$L_p = F \cdot \frac{(a + b)}{2f} \quad (1)$$

kde:	L_p [mm]	minimální délka přeplátování spoje;
	F [MPa]	pevnost v tahu spojovaného materiálu; ⁴
	f [MPa]	pevnost ve smyku použitého lepidla;
	a [mm]	tloušťka jednoho lepeného dílce;
	b [mm]	tloušťka druhého lepeného dílce.

Pro vyloučení možných negativních vlivů při lepení, snižujících pevnost spoje, se výsledná minimální délka přeplátování vynásobí koeficientem bezpečnosti, např. 1,5 až 2. U spojů s příložkami a spojů dvojité přeplátovaných je minimální délka přeplátování poloviční.

4.2 Aplikace lepidla

Další podmínkou pro vznik dostatečně soudržného spoje je i rovnoměrná, celistvá, přiměřeně tlustá vrstva lepidla ve spáře. Ta závisí na optimální tloušťce nánosu lepidla daného pro určitý typ obou lepených povrchů, vhodné technologii aplikace lepidla, zpevnění spoje a na způsobu vytvrzování.

Při volbě optimální tloušťky filmu lepidla (0,05 až 0,25 mm) musíme zahrnout i vliv ostatních faktorů, jako je viskozita a reaktivita lepidla, nasákavost lepených povrchů a lisovací tlak. S nasákavostí adherendů souvisí jejich struktura, pórovitost a tloušťka.

⁴ Při lepení dvou či více odlišných materiálů se při výpočtu užije hodnota pevnosti v tahu P [MPa] méně pevného materiálu.

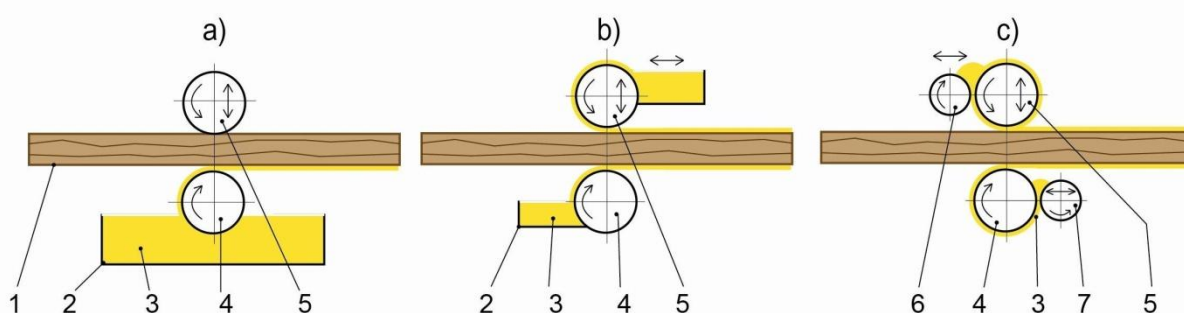
V případě lepení tenkých porézních podkladů (tkanin, dýh, papíru), u kterých se nedá zamezit prosáknutí lepidla na lícovou stranu adherendu, je nutné, aby byla vrstva lepidla co nejúspornější. Avšak musí být dostatečně velká pro smáčení obou kontaktních ploch.

Předpokládá-li se vytěsnění lepidla ze spáry v počáteční fázi vytvrzování, např. z důvodu řídnutí směsi při tvrzení u reaktivních lepidel, je nutné vložit do spáry distanční dráty průměru 0,05 až 0,2 mm. Další možností pro zamezení vytlačení lepidla ze spáry je přidání příměsí tříděných korundových zrn do lepicí směsi v množství 1 až 3 %.

Na způsob aplikace lepidla má vliv i požadovaná tuhost spoje. V případě požadavku měkkého a ohebného spoje se lepidlo nanáší na dotykové plochy adherendů ve formě pravidelně rozmístěných bodů nebo tenkých proužků. Na tento případ narazíme např. při laminaci měkkých pěnových hmot na bázi polyuretanu textilními potahovými materiály.

Aplikaci lepidla můžeme realizovat buď ručně, nebo formou průmyslových operací. Ruční nanášení se provádí, v případě lepení malých ploch kapalnými lepidly, štětci, kartáči, ručními válci se zásobníkem lepidla nebo stěrky. Pro nanesení rovnoměrné vrstvy lepidla se používá stěrka s vypilovanými zářezy, tzv. hřebenem. V průmyslové výrobě se užívají pro aplikaci lepidel speciální zařízení. Kapalná lepidla jsou nanášena clonovacími stroji, válcovými nanášecími linkami, lištovými nanášecími stroji, clonovacími stroji, stříkacími tryskami nebo pneumaticky plněnými štětci. V případě použití tavných lepidel se používají speciální zařízení, ve kterých se v tavné komoře lepidlo rozpustí a aplikuje na lepený povrch.

[1] [6]



Obrázek 6: Znáznornění způsobů aplikace lepicí směsi: **a** – dvouválcová nanášecí linka pro jednostranné nanášení směsi; **b** – dvouválcová nanášecí linka pro oboustranné nanášení směsi; **c** – čtyřválcová nanášecí linka pro oboustranné nanášení smě; **1** – lepený adherend; **2** – zásobník na lepicí směs; **3** – lepicí směs; **4** – spodní nanášecí válec; **5** – horní válec; **6,7** – dávkovací válec.

4.3 Fyzikální aspekty

Na procesu smáčení dřevěného povrchu lepidlem se podílí mnoho faktorů. Mezi ně lze zařadit povrchovou energii lepidla a povrchu adherendu (podkladu), viskozitu lepidla, teplotu lepení a tlak na lepenou spáru.

4.3.1 Smáčení

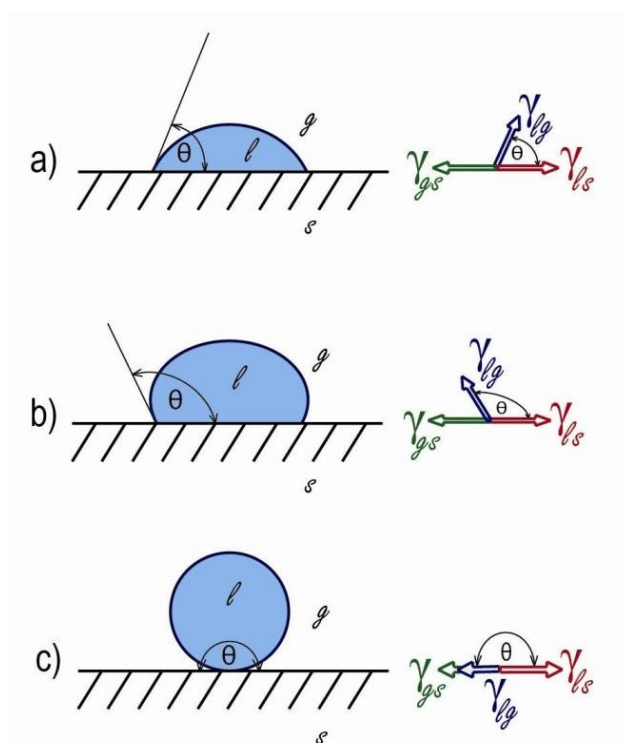
Pojmem smáčení se rozumí schopnost kapky kapaliny vytvořit malý kontaktní úhel se zkoušeným povrchem. **Smáčivost** povrchu lze určovat mnoha způsoby. Nejběžnější je však způsob kapkový, kdy se na zkoušený povrch aplikuje kapka vody daného průměru a s použitím optických přístrojů se změří kontaktní úhel θ . Dalším způsobem jak lze odečíst kontaktní úhel mezi kapkou a povrchem, se kterým je v kontaktu, je vyfotografování této kapky. Ze zvětšené fotografie pak lze kontaktní úhel přímo odečíst. V obou případech se doporučuje dvacetinásobné zvětšení obrazu.

Kontaktní úhel je úhel svírající se mezi okrajem kapky a rovinou povrchu, na kterém je nanese. Podle velikosti úhlu rozlišujeme povrchy smáčivé a nesmáčivé [7].

Smáčivé neboli lyofilní či hydrofilní povrchy, se vyznačují přilnavostí kapaliny k jejich povrchu. Úhel smáčení hydrofilních povrchů je menší než 90° , viz obr. 7a. Dokonalé smáčení nastává tehdy, je-li $\theta = 0$; $\gamma_{sg} = \gamma_{ls} + \gamma_{lg}$. [8]

Nesmáčivé neboli lyofobní povrchy se vyznačují nedostatečným přilnutím kapaliny k povrchu. Kontaktní úhel mezi kapalinou a povrchem je větší než 90° , viz obr. 7b. V jistém případě může nastat stav, kdy je kapalina na daném povrchu **dokonale nesmáčivá** a platí podmínka $\gamma_{lg} = 180^\circ$, viz obr. 7c. [7] [8]

Je-li kontaktní úhel θ menší než 30° můžeme říci, že zkoušený materiál je adhezně aktivní. Z toho vyplývá, že materiály s vysokým kontaktním úhlem mají špatné povrchové smáčení. [6]



Obrázek 7: Rozdělení kapalin dle smáčivosti na základě kontaktního úhlu: **a)** – smáčení; **b)** – nesmáčení; **c)** – dokonalé nesmáčení.

Aby mohla kapalina pevnou látku smáčet, musí být její povrchové napětí menší než povrchové napětí smáčeného materiálu. Největší povrchové napětí ze všech kapalin má voda ($0,0718 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$), a proto lze z jejího chování na povrchu pevného materiálu simulovat smáčení dané hmoty jinými tekutinami nebo lepidly.

Posuzování smáčivosti adherendu podstatně ovlivňují adsorbované cizí látky na povrchu, které značně zkreslí obraz povrchového napětí materiálu. Jsou to například vzduch, prach, vlhkost a podobně. U plastů se provádí povrchové úpravy například oxidací plamenem, plasmatickým výbojem nebo korónovým výbojem. Tyto úpravy se používají ke zvýšení polaritu a povrchové energie plastového povrchu a ke zlepšení jeho lepitelnosti. Příznivý vliv na smáčivost adherendu přináší i dodatečná úprava povrchu (např. odmaštění, oxidace chemickými a fyzikálními prostředky). Do lepidel se přidávají smáčedla (tenzidy), jejichž účelem je snížení povrchového napětí.

Se snižujícím se množstvím polárních rozpouštědel nebo zvyšujícím se množstvím povrchově aktivních látek v adhezivu se snižuje kontaktní úhel i povrchová energie adheziva mezi adhezivem a adherendem. Tím však klesá i koheze vrstev lepidla a lepidlo se stává citlivým na zpěnění.

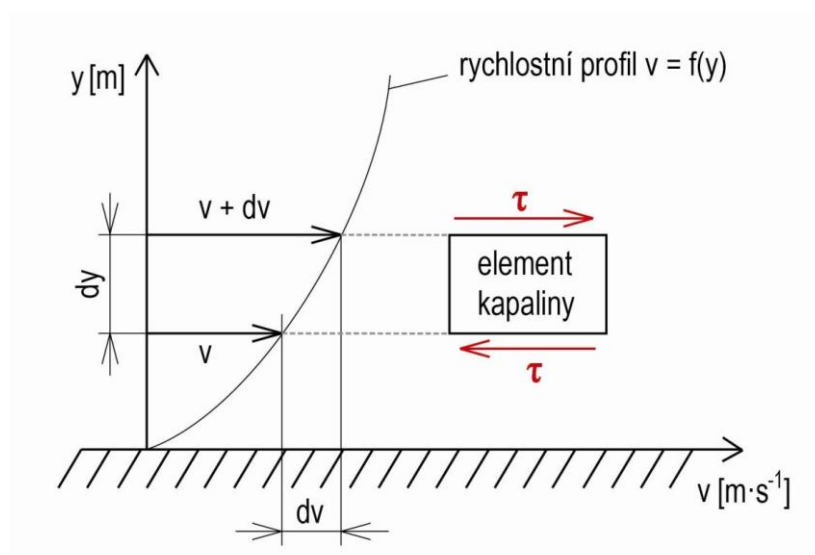
Mějme na paměti, že většina měření kontaktního úhlu jsou rovnovážné hodnoty a nemusí zahrnovat dynamiku procesu lepení. Další velmi důležitá vlastnost spojená se smáčením je proudění přes povrch. Průtok je závislý na viskozitě lepidla a zároveň na kontaktním úhlu. S vyšší viskozitou je lepidlo méně tekuté a méně smáčí povrch. [6] [9]

4.3.2 Viskozita lepidla

Viskozita je fyzikální vlastnost obecně všech tekutin, se kterými se v technické praxi lze setkat. V tom nejjednodušším podání lze viskozitu chápat jako odpor kapaliny při přesouvání. Obecně při laminárním proudění reálné kapaliny vzniká ve stykové ploše dvou vrstev, které se pohybují různou rychlostí, tečné napětí τ , jehož prostřednictvím má rychlejší vrstva snahu urychlovat vrstvu pomalejší a vrstva pomalejší má tendenci zpomalovat vrstvu rychlejší [10], viz obrázek 8. Dle Newtonova zákona potom pro **tečné napětí** platí:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}; \quad (2)$$

kde: τ [Pa]	tečné napětí;
η [Pa·s]	dynamická viskozita;
v [m·s ⁻¹]	rychlost proudění;
y [m]	poloha ve směru kolmém na rychlost proudění;
dv/dy [s ⁻¹]	tzv. rychlostní spád.



Obrázek 8: Zjednodušené znázornění tečného napětí při pohybu tekutiny

Konstantou úměrnosti je dle [2] veličina zvaná dynamická viskozita η .

Dynamická viskozita je obecně funkcí stavových veličin tlaku a teploty kapaliny, přičemž v případě kapalin s rostoucí teplotou dynamická viskozita klesá, na rozdíl od plynů, kde s rostoucí teplotou roste. Pokud je dynamická viskozita v určitém případě konstantní, lze příslušnou kapalinu označit za newtonskou. V opačném případě se jedná o kapalinu nenewtonskou.

Kromě dynamické viskozity se lze setkat i s **viskozitou kinematickou** ν . Ta je na rozdíl od dynamické viskozity pouze uměle zavedená fyzikální veličina, která zahrnuje hustotu proudícího média dle vztahu (3) a často tak zjednodušuje výpočetní vztahy:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}; \quad (3)$$

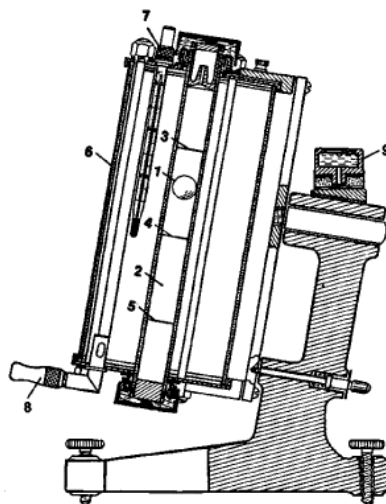
kde: ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] kinematická viskozita;
 ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota média.

Stanovení viskozity roztokových lepidel provádíme pomocí různých typů viskozimetrů. Jedním z těchto viskozimetrů je například Höpplerův viskozimetr, který pracuje na principu měření doby pádu kuličky o dané hmotnosti mezi dvěma značkami měrné trubice viskozimetru, která je naplněna roztokem lepidla, jehož viskozitu určujeme. V případě této metody měření viskozity pak stanovujeme dynamickou viskozitu dle vztahu:

$$\eta = K \cdot t \cdot (\rho_k - \rho_1); \quad (4)$$

kde: K [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$] konstanta použité kuličky;
 t [s] doba pádu kuličky;
 ρ_k [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota kuličky;
 ρ_1 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota zkoušeného lepidla.

Podrobné odvození vztahu (4) viz [11].



Obrázek 9: Zjednodušené schéma Höpplerova viskozimetru [12]: 1 – kulička; 2 – trubice s tekutinou; 3, 4, 5 – značky na měrné trubici; 6 – lázeň s termostatickou kapalinou; 7 – teploměr; 8 – potrubí pro připojení přístroje k termostatu; 9 – vodováha.

Jiným typem viskozimetrů jsou viskozimetry rotační, které užíváme zejména pro rychlé a přesné měření viskozit roztoků lepidel.

4.3.3 Stanovení hodnoty pH lepidla

Kvalitu lepeného adherendu ovlivňují kromě použitého lepidla i látky, které jsou obsaženy v tomto lepidle. Na trhu se objevuje mnoho lepidel, která pro jejich výrobu nebo plnění své funkce vyžadují kyselý nebo zásaditý reagující katalyzátory, které mohou ovlivnit kvalitu povrchové vrstvy adherendu, a s tím související kvalitu spoje.

Hodnota pH se zkouší univerzálními indikátorovými papírky nebo přesnějšími pH-metry. V případě použití indikátorových papírků se postupuje tak, že se papírek ponoří do zkoušeného roztoku lepidla a po 1 minutě se zbarvení porovná s barevnou škálou. Přesnější pH-metry jsou ve většině případů vybaveny skleněnou elektrodou. Hodnota pH se odečítá přímo na stupnici po ponoření elektrody do zkoušeného roztoku.

Lepidla vyrobená ve formě vodných roztoků mají hodnotu pH v rozmezí 7 až 8. Při této hodnotě vykazují lepidla nejdelší dobu skladování. Pro vytvrzení lepidel za normální nebo zvýšené teploty se při jejich zpracování přidávají do směsi tvrdidla, jejichž přídavkem se sníží hodnota pH. Nesmí však klesnout pod hodnotu 2,5. Následkem i nepatrného snížení pH pod 7 se výrazně zkrátí doba skladování lepidla a hrozí i jeho zgelování.

Například vodou rozpustné fenolické rezoly s vyšším obsahem volného hydroxidu sodného, tvrzené za horka mohou při přebytku tvrdidla snižovat soudržnost povrchové vrstvy dřeva. Podobně se projevují i dvousložková fenolická lepidla vytvrzovaná roztoky fenolsulfonové nebo p-toluensulfonové kyseliny.

Nejdůležitější stanovení hodnoty pH je u močovino-formaldehydových lepidel, protože uvolňují formaldehyd, který se za přítomnosti vzdušného kyslíku přeměňuje na kyselinu mravenčí. Působení nestálých kyselin na povrch adherendu a kovové prvky v jeho blízkosti musí být vhodně odstraněny. Modifikující látkou pro snížení obsahu volného formaldehydu, především v močovino-formaldehydových lepidlech, je například močovina, močovina se solemi žiravých zemin nebo sulfitovými výluhy, amoniak a spousta dalších. [1] [2]

4.4 Vliv dřevěného adherendu

Za účelem získání kvalitního a spolehlivého spoje je nutná i dostatečná soudržnost povrchů lepených ploch. Ta závisí na struktuře adherendu (zejména pórovitostí a objemovou hustotou), jeho složení i na způsobu povrchové úpravy.

Množství potřebného lepidla ve spáře a použitý tlak při lepení závisí na tom, zda se spojují dřeva tvrdá nebo měkká, hustá nebo pórovitá. Velikost síly použitého tlaku při lepení je dána druhem dřeviny, druhem lepidla, ale i teplotou při lisování.

Obecně platí, že čím vyšší hodnotu objemové hmotnosti má lepený materiál, tím soudržnější je i jeho povrch. Při špatné nebo nedostatečné soudržnosti adherendu s lepidlem netvoří pevné spojení a i vlivem slabého namáhání (např. působení vlhkosti) se může lepený spoj rozštěpit ve vrstvě přilehlé k lepidlu. V takovém případě jsou po odtržení na filmu lepidla viditelné zbytky adherendu. Mezi materiály s nízkou objemovou hmotností a tedy s nízkou soudržností řadíme například lehčené pěnové hmoty, minerální plsti, měkké dřevovláknité desky apod. [2]

4.5 Pevnost lepeného spoje

4.5.1 **Smyková pevnost**

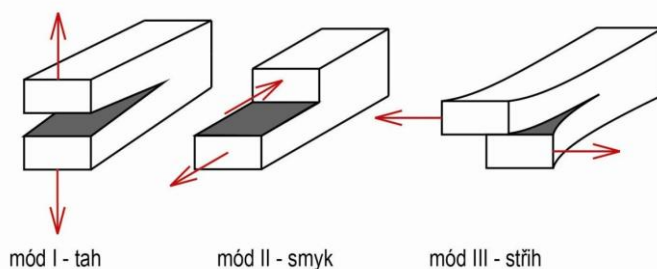
Mezi nepoužívanější zkoušky pro stanovení pevnosti lepeného spoje patří pevnost ve smyku ve směru **rovnoběžně s vlákny**. Jelikož většina lepidel na dřevo má v tomto směru

vyšší pevnost než dřevo samotné, nemusí dojít k potenciálnímu využití pevnosti lepidla. Od lepených konstrukčních soustav se očekává, že překročí pevnost dřeva. Požadavek na pevnost spoje je dán normativními hodnotami pevnosti ve smyku lepené sestavy (ČSN EN 301) a odpovídající hodnotou procenta kohezního poškození smykové plochy spoje.

4.5.2 Lomová houževnatost

Jednou z významných vlastností nejen lepených spojů je lomová houževnatost. Tato veličina byla zavedena v rámci vědního oboru lineárně elastické lomové mechaniky. Jedná se o materiálovou charakteristiku vyjadřující houževnatost materiálu, tj. odpor materiálu vůči iniciaci a následnému růstu trhliny. S její pomocí jsme schopni počítat únosnost konstrukčního dílu s defektem v podobě trhliny (popř. dvou dílů spojených lepeným spojem).

V rámci definice lomové houževnatosti je nutné zavést pojem součinitel (faktor) intenzity napětí K . Tato veličina jistým způsobem popisuje napjatost v okolí trhliny a její kritická hodnota (tj. hodnota faktoru intenzity napětí v okamžiku lomu) se právě označuje jako lomová houževnatost K_C . Hodnota faktoru intenzity napětí závisí především na způsobu zatěžování, dále pak na velikosti napětí a rozměru trhliny. Rozlišujeme tři základní módy zatěžování, viz obrázek 10. Pro určení parametrů lomové houževnatosti lepených spojů lze vycházet z různých typů zatěžovacích zkoušek a tvaru lepených těles. Většinou se pro lepené dřevěné spoje využívá zkoušení na DCB lepených vzorcích. [13] [14]



Obrázek 10: Zatěžovací módy

5 ZPŮSOBY PLNĚNÍ EPOXIDOVÝCH LEPIDEL

Epoxidové pryskyřice jsou velmi kvalitní lepidla, používaná hlavně v leteckém, automobilovém a stavebním průmyslu. Tyto polymery jsou velmi odolné vůči korozi, tepelné stabilitě, nízkému smrštění při vytvrzení a vykazují vysoký modul pevnosti.

Nevýhodou epoxidových pryskyřic je křehkost, kterou způsobuje jejich značně zesíťovaná povaha. Existuje mnoho faktorů zlepšujících houževnatost epoxidové pryskyřice prostřednictvím její modifikace. Jedním z těchto faktorů je morfologie vytvrzujících materiálů a adheze mezi částicemi a matricí. Další možností jak zlepšit vlastnosti epoxidových pryskyřic je přidání anorganického plniva do polymerní matrice za účelem zvýšení jejich tvrdosti, tuhosti a smrštění. Jako další faktor přispívající ke zvýšení houževnatosti pryskyřic lze uvést vztah mezi vlákny a mechanickými vlastnostmi a morfologií epoxidové matrice. Často užívané je vyztužování skleněnými nebo uhlíkovými kontinuálními vlákny. Musíme však znát efekt působení vyztužného vlákna na epoxidovou matrici. Zlepšení mechanických a dalších vlastností kompozitních materiálů závisí především na obsahu plniva, jeho tvaru a velikosti, vlastnosti a stupně dispergace. [15]

Zlepšení houževnatosti epoxidových pryskyřic lze dvěma zásadními metodami:

- **chemickou modifikací tuhého epoxidového řetězce** – sníží se hustota zesíťování zvýšením molekulární hmotnosti epoxidových monomerů a snížením funkčních (reaktivních) skupin u tvrdidel;
- **modifikací epoxidu** – pomocí zabudování dispersní látky, která obsahuje částice s vyztužující funkcí.

Vyztužující funkci mají dispersní látky jako například kaučuky, termoplastické látky nebo inkluze pevných částic (silika, sklo apod.). Nejlepších výsledků bylo dosaženo v případě použití kaučuku. [16]

5.1 Kaučuky

Jednou z možností jak zvýšit lomovou houževnatost epoxidové pryskyřice je její modifikace kaučukem. Jde o velmi jemný speciálně upravovaný pryžový prach, jehož základ

tvorí kombinace přírodního a syntetického kaučuku o velikosti mikro částic 0 – 400 μm (AGP4) a 400 – 800 μm (AGP8).

Nejvíce sledované jsou skupiny kaučuků s obsahem kopolymerů butadienu a akrylonitrilu. Ty jsou dostupné s rozdílným množstvím akrylonitrilu (v rozmezí 0 až 26 %). Kvůli nízké molekulové hmotnosti (3400 až 4000 g/mol) jsou butadien–akrylonitrilové kaučuky **rozpustné (reaktivní)** v kapalině DGEBA (Bisphenol A diglycidyl ether) a mohou se dále syntetizovat. Po vytvrzení směsi epoxidu a kaučuku se pryžové částice vysráží a vznikne druhá fáze. Zvýšení lomové houževnatosti epoxidové pryskyřice je znatelné už při plnění 10 % phr kaučukovým plnivem. Je však znatelné mírné snížení modulu pružnosti a teploty skelného přechodu. Avšak proces tohoto vytvrzování se stále zkoumá. Jedním z nejvíce sledovaných atributů je množství energie, kterou dokáže kaučuk nebo matrice vstřebat nebo ji absorbovat. S tím souvisí i vznik trhliny právě v matrici. Tyto vysoce tvárné epoxidové pryskyřice běžně vykazují poměrně nízké hodnoty skelného přechodu (obvykle pod 100 °C) a nízkou hustotu zesíťování. Z tohoto důvodu nejsou vhodné pro vysoce kvalitní konstrukční aplikace, jako jsou například kompozity nebo lepidla využívaná v oblastech elektroniky nebo vesmíru. [16]

Vedle reaktivních kaučukových modifikátorů se objevují i některé **nerozpustné (nereaktivní)**, které jsou používány pro úpravu epoxidových systémů. Takto připravené disperze epoxidů s nerozpustnými kaučuky jsou obzvláště výhodné při použití v mnoha adhezivních a kompozitních aplikacích, protože objem kaučuku v kompozitu je relativně stálý a odolný na změny v průběhu vytvrzování. S rostoucím množstvím kaučuku v matrici se nesnižuje teplota skelného přechodu. To však platí pouze do určité míry. Nicméně, modul pružnosti u takto modifikovaných epoxidových struktur se může měnit nezávisle na teplotě skelného přechodu T_g .

Epoxidové struktury modifikované kaučukem jsou příznivě odzkoušeny v případě jejich použití s lepidly. Přesto v případě požadavku vysoce kvalitní epoxidové pryskyřice je vyztužovací účinek kaučukem obvykle nedostačující. To je způsobeno vysokou hustotou zesíťování těchto pryskyřic a tím snížení molekulárního toku. Dalším důvodem nedostačujících vlastností modifikujících kaučuků je vliv nízké teploty jejich skelného přechodu a tím snížení maximální teploty použití takto modifikovaných epoxidových pryskyřic. [16]

5.2 Termoplasty

Další možností, jak zvýšit lomovou houževnatost epoxidových pryskyřic, je použití termoplastů (např. polyether ketonů, apod.) jako plniva do epoxidového systému. Je možné je použít jako granulované částice nebo jako polymery rozpuštěné v kapalně epoxidové pryskyřici, kde se později vysráží jako sekundární precipitovaná fáze. Největší předností těchto termoplastických plniv je, že jejich použitím do epoxidové pryskyřice nedojde ke snížení modulu pružnosti ani teploty skelného přechodu, ale ke zvýšení lomové houževnatosti v přímé závislosti s množstvím přidaného termoplastického plniva.

Ve srovnání epoxidových systémů obsahujících kaučukové plnivo je použití tuhých termoplastických polymerů jako plniva výhodnější z hlediska zlepšení lomové houževnatosti pro vyšší hustotu zesíťování epoxidových systémů. Použití těchto termoplastů umožňuje dobrou přilnavost mezi epoxidem a termoplastickou fází za pomoci chemických vazeb, které zajišťují předpokládanou morfologii a chemickou odolnost amorfních termoplastů. I přes to, že jsou epoxidové termoplastické systémy k dispozici, je třeba brát v úvahu omezené technologie zpracování a také jejich vyšší výrobní náklady. [16]

5.3 Celulózová vlákna

V neposlední řadě se pro zvýšení lomové houževnatosti epoxidových pryskyřic používají jako plniva přírodní celulózová vlákna. Jejich použití je v posledních letech více rozšířené, jelikož mají mnoho výhod. Lze mezi ně zařadit jejich udržitelnost, recyklovatelnost, obnovitelnost, širokou dostupnost, nízkou hustotu, biologickou rozložitelnost a v neposlední řadě i nízké náklady na pořízení těchto kompozitních struktur. Poslední dobou se s různými modifikacemi nanocelulózy (NFC – *nano fibrile cellulose*) zvyšuje výběr možných vláken a rozšiřuje se jejich využití kvůli jejich vynikajícím vlastnostem v kompozitech. [17]

Jelikož mají celulózová vlákna hydrofilní charakter, potlačující homogenní dispergaci vláken v nepolárních polymerech, je nezbytné vlákna předem upravit takovým způsobem, aby se jejich charakter transformoval na hydrofobní a tím pádem se lépe propojili s epoxidovou maticí.

6 CÍL PRÁCE

Výzkum vlivu trvanlivosti FRP/dřevěného systému vykazuje z provedené rešerše nejednotné výsledky. Důležitou skutečností však je, že epoxidové systémy velmi často selhávají při vlhkostní zátěži. Tento fakt je podnětem k hlubšímu studiu epoxidových systémů a jejich případných modifikací.

Cílem této práce je pokusit se najít vhodnou modifikaci lepidla, která zvýší duktilitu a pevnost systému FRP/dřevo a současně zlepší jeho soudržnost. Pro tuto modifikaci jsem na základě rešerší zvolila dvě plniva - elastomer (kaučuk) a organické plnivo (jíl). Po důsledné dispergaci plniv v matrici by měl být sledován vliv těchto modifikací jednak na parametry epoxidové pryskyřice, později v navazujícím systému i na trvanlivost systému FRP/dřevo.

Výsledkem tohoto hodnocení bude údaj popisující vliv mikroplniva na mechanické vlastnosti a parametry lepidla. Budoucí práce, která bude na tuto práci rámcově navazovat, se po výběru vhodného plniva již bude zabývat trvanlivostními zkouškami systému FRP/dřevo jako celku.

7 METODIKA PRÁCE

7.1 Epoxidové lepidlo

Byl použit dvousložkový epoxidový systém EPOLAM 2017 se standardním tvrdidlem na aminové bázi. Vlastnosti lepidla jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tabulka č. 5: Fyzikální vlastnosti EPOLAM 2017 RESIN [18]

Fyzikální vlastnost	Jednotka	Hodnota
Viskozita při 25 °C	mPa·s	2,85
Hustota při 25 °C	kg/l	1,17
Barva	–	sv. jantarová

Tabulka č. 6: Mechanické vlastnosti EPOLAM 2017 HARDENER při teplotě 23 °C po vytvrzení [18]

Mechanická vlastnost	Jednotka	Hodnota
Pevnost v ohybu	MPa	132
Pevnost v tahu	MPa	73
Prodloužení po přetržení	%	6
Teplotní odolnost při zátěži	°C	84

Použití epoxidů je výhodné z hlediska jejich výborných mechanických vlastností, nízké viskozity, odolnosti proti vodě a vlhkému prostředí a také jejich vynikající adhezi. Poměr epoxidu EPOLAM 2017 a tvrdidla EPOLAM 2017 je výrobcem deklarován v poměru 100:30. Pro získání požadovaných mechanických vlastností a tepelné odolnosti, výrobce doporučuje vzorky po odformování dodatečně temperovat při teplotě 60 °C po dobu 24 hodin, tzv. *post-curing*. [18]

7.2 Plnivo

7.2.1 Elastomer – Kaučuk

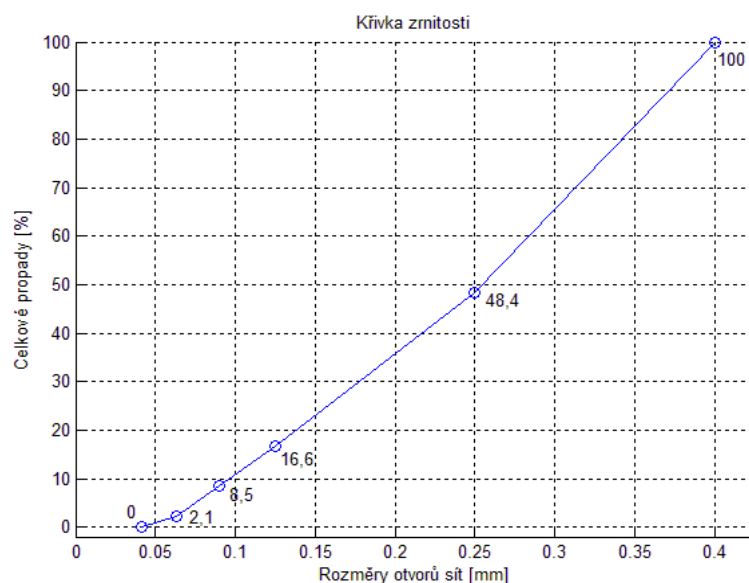
Jedná se o velmi jemný speciálně upravovaný pryžový prach, jehož základ tvoří kombinace přírodního a syntetického kaučuku o velikosti mikro částic 0 – 400 μm (AGP4) a 400 – 800 μm (AGP8).

Pro zjištění procentuálního zastoupení jednotlivých jemných frakcí v kaučuku byl stanoven **sítový rozbor** pomocí vakuové prosévačky. Vakuová prosévačka se používá pro suché třídění práškovitých vzorků s velikostí částic od 5 μm až po 4 mm. Působením proudu vzduchu jsou jemné částice nuceny procházet sítím pomocí sání vysavače. Tento proces probíhá prostřednictvím vakuového zařízení, které vyvolá podtlak. [19]

Zbylé hmotností zbytky na sítě s určitou velikostí oka byly přepočítány na procentuální zbytek na daném sítě. Následně byl vypočítán procentuální propad sítím o dané velikosti otvorů. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tabulce č. 7.

Tabulka č. 7: Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kaučuku

Velikost otvorů síta [mm]	Zbytek na sítě [%]	Propad sítím [%]	Podíl frakce z navážky 50 g [%]
0,400	0	100	51,6
0,250	51,6	48,4	31,8
0,125	83,4	16,6	8,1
0,090	91,5	8,5	6,4
0,063	97,9	2,1	2,1
0,041	100	0	

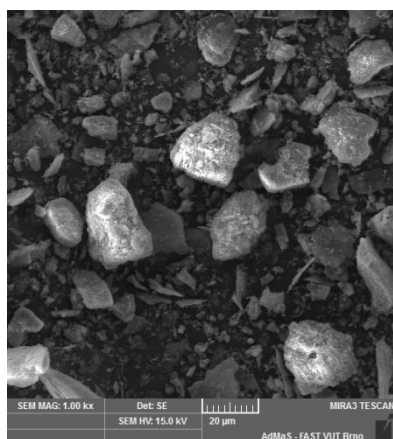


Obrázek 11: Grafické znázornění křivky zrnitosti kaučuku

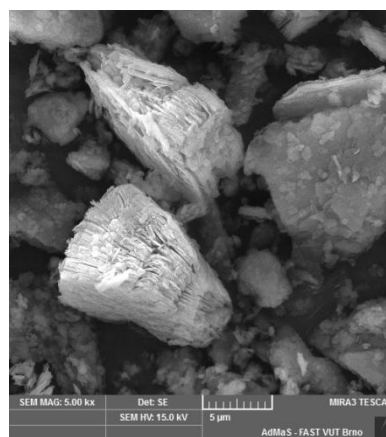
7.2.2 Organické plnivo – jíl

Jíl pod označením BMK-45 je složen z 52 - 54 % SiO_2 , z více jak 43 % Al_2O_3 a z méně jak 0,1 % Fe_2O_3 a je bílé barvy. Měrný povrch tohoto plniva je udáván v rozmezí 16 000 - 18 000 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. Hodnota pucolánové aktivity se udává více jak 1 000 $\text{mg}(\text{Ca}(\text{OH})_2) \cdot \text{g}^{-1}$. Objemová hmotnost daného jílu v setřeseném stavu je v rozmezí 450 - 550 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, ve stavu volně sypaném pak v rozmezí 370 - 450 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Při sledování jílu SEM bylo zjištěno, že většina zrn tvoří shluky jednotlivých jílových zrníček. To bylo pravděpodobně následkem špatného rozemletí, a proto se velikost zrn jílu pohybovala v řádu mikrometrů.



Obrázek 12: Jílovitý prášek tvořící shluky jednotlivých zrníček jílu (1000x)



Obrázek 13: Shluky jílovitých zrníček (5000x)

7.3 Modifikace epoxidové směsi

7.3.1 Epoxidová směs plněná kaučukem

Do ohřáté epoxidové pryskyřice na teplotu cca 60°C se přidá určité množství kaučuku. Při přípravě modifikované epoxidové směsi byl použit kaučuk v množstvích 1; 10; 15; 20; 25 a 30 % phr. Následně se směs disperguje v epoxidu pomocí ultrazvuku při amplitudě 72 Hz, do dosažení celkové energie ultrazvukové homogenizace 30 kJ. Pro snížení teploty sondy je mezi cykly 30 s prodleva. Po dostatečné dispergaci lepidla a kaučuku se zahřátá směs ochladí na teplotu cca 40 °C a přidá se k ní dané množství tvrdidla. Celá směs se řádně promíchá a vylije do silikonové formy ve tvaru ISO lopatek dle ČSN EN 527-1.



Obrázek 14: Nahřívání epoxidového lepidla



Obrázek 15: Nastavení ultrazvuku



Obrázek 16: Sestava ultrazvuku



Obrázek 17: Silikonová forma vylitá směsí

Pro stanovení vlivu kaučuku na výsledné parametry modifikované epoxidové matrice byly směsi plněny různým podílem kaučuku. Množství aplikovaného epoxidu odpovídá množství na dvě formy pro stanovení tahových vlastností epoxidu (celkem 6 vzorků/záměs).

Tabulka č. 8: Složení směsí pro dané množství kaučuku

Označení	Typ epoxidového lepidla	Typ tvrdidla	Množství kaučuku [% phr]	Dispergace
EP0	EPOLAM 2017 RESIN	EPOLAM 2017 HARDENER	–	UTZ
EP1			1	
EP10			10	
EP15			15	
EP20			20	
EP25			25	
EP30			30	

7.3.2 Epoxidová směs plněná jílem

Pro porovnání pevností v tahu, modulů pružnosti a poměrného prodloužení byly vytvořeny vzorky epoxidových lepidel modifikované organickým plnivem, tedy jílem.

Do ohřáté epoxidové pryskyřice na teplotu cca 60°C se přidá dané množství jílu. Při přípravě modifikované epoxidové směsi byl použit jíl v množství 1; 3 a 5 % phr. Následně se směs disperguje v epoxidu pomocí ultrazvuku při amplitudě 65 Hz, do dosažení celkové energie ultrazvukové homogenizace 30 kJ. Pro snížení teploty sondy je mezi cykly 30 s prodleva. Po dostatečné dispergaci lepidla a jílu se zahřátá směs ochladí na teplotu cca 40 °C a přidá se k ní dané množství tvrdidla. Celá směs se řádně promíchá a vylije do silikonové formy ve tvaru ISO lopatek dle ČSN EN 527-1.



Obrázek 18: Dispergace jílů a epoxidu



Obrázek 19: Sestava ultrazvuku při dispergaci jílů

Pro stanovení vlivu organického plniva na výsledné parametry modifikované epoxidové matrice byly směsi plněny různým množstvím jílu. Z každé směsi bylo připraveno 6 vzorků pro stanovení tahových vlastností epoxidu.

Tabulka č. 9: Složení směsí pro dané množství organického plniva - jílu

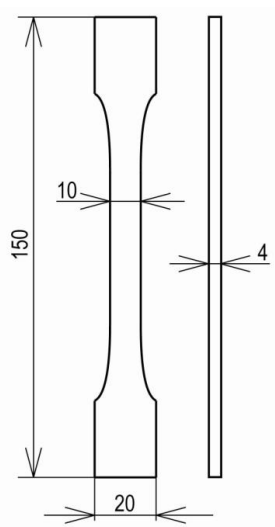
Označení	Typ epoxidového lepidla	Typ tvrdidla	Množství jílu [% phr]	Dispergace
EP1	EPOLAM 2017 RESIN	EPOLAM 2017 HARDENER	1	UTZ
EP3			3	
EP5			5	

7.4 Metodika zkoušek

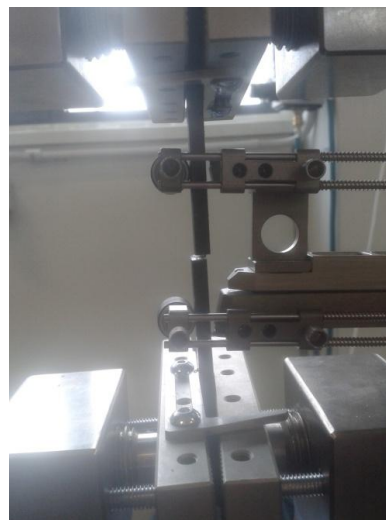
7.4.1 Stanovení tahových vlastností epoxidu

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN ISO 527–1 Plasty – **Stanovení tahových vlastností** – Část 1: Základní principy s použitím silikonové formy.

Nejprve se změří délka vzorku, šířka a tloušťka zkušební části vzorku. Poté se vzorek upne do čelistí a na jeho střední část se nasadí průtahoměr, který měří prodloužení při porušení vzorku. Následně se začne vzorek pomocí čelistí namáhat na tah rychlostí 1 mm/min. Síla dosažená při porušení vzorku se zaznamená, dosadí do vzorce a vypočte se pevnost v tahu.



Obrázek 20: Tvar a rozměry zkušební vzorku



Obrázek 21: Uchopení vzorků do upínacích čelistí a porušení v pracovní části



Obrázek 22: Vzhled a typ porušení vzorku – 5 %
jílu

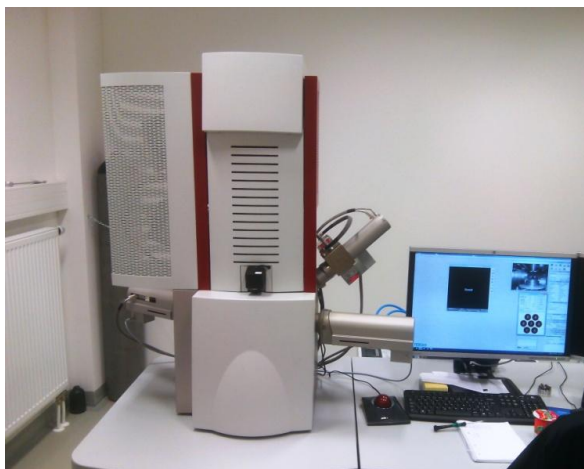


Obrázek 23: Vzhled a typ porušení
vzorku – 10 % kaučuku

7.4.2 SEM – skenovací elektronový mikroskop

Skenovací elektronový mikroskop se používá k pozorování povrchů vzorků. Výsledný obraz tvoří sekundární signál – odražených nebo sekundárních elektronů. Právě proto se SEM pokládá za nepřímou metodu. Mezi velkou výhodou SEM (oproti světelnému mikroskopu) patří jeho velká hloubka ostrosti, v důsledku které lze z dvojrozměrných fotografií ze SEM nalézt jistý trojrozměrný aspekt. Dále je také pomocí skenovacího elektronového mikroskopu možné sledovat i kvantitativní zastoupení jednotlivých prvků ve vzorku díky vzniklým dalším signálům jako je například rentgenové záření, Augerovy elektrony apod. [20]

Při zkoumání vzorků SEM je nutný jejich čistý, suchý a hlavně vodivý povrch. Jestliže vzorek nemá vodivý povrch, musí se opatřit suchým vodivým nanopráškem (zlato).



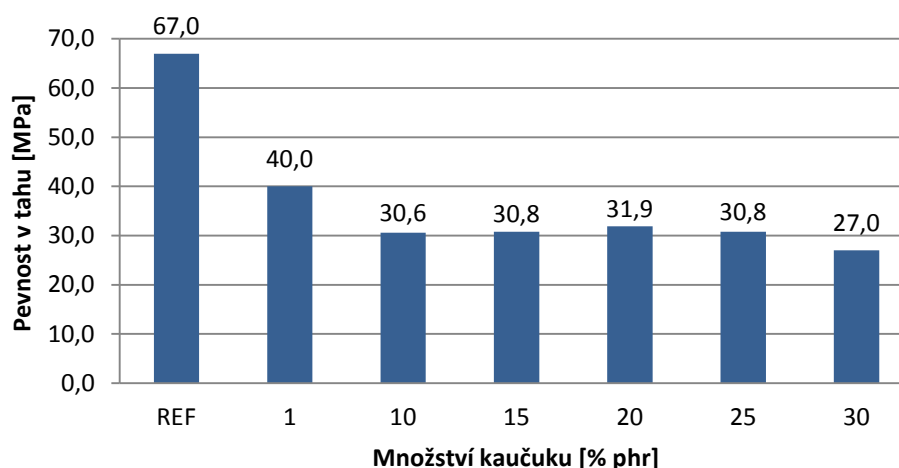
Obrázek 24: Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XM

8 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

8.1 Vliv různého množství kaučuku v epoxidu

8.1.1 Pevnost v tahu

Na vzorcích s odlišným množstvím plnění kaučukem se zjišťovala pevnost v tahu. Výsledné hodnoty získaných pevností jsou zřejmé z obrázku č. 25. Nejvyšší hodnota pevnosti v tahu byla zjištěna u referenčního vzorku, která oproti pevnostem udávaným výrobcem dosahovala pevnost 67,0 MPa (výrobce deklaruje 73 MPa). V případě modifikovaných epoxidů byla nejvyšší pevnost v tahu dosažena při plnění 1 % kaučuku. Nejnižší hodnotu pevnosti v tahu však vykazovala směs při plnění epoxidu 30 % kaučuku. Nicméně hodnoty pevností nevykazují významný lineární pokles. Souhrnné výsledky jsou uvedeny v příloze 1 a 2.

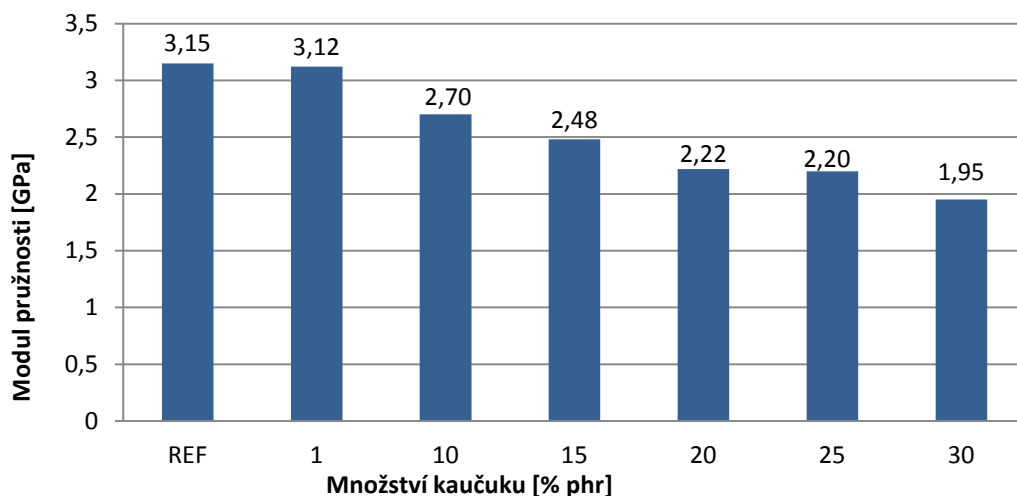


Obrázek 25: Výsledné průměrné hodnoty pevnosti v tahu při různém plnění epoxidu kaučukem

8.1.2 Modul pružnosti

Modul pružnosti se s vyšším podílem kaučuku v matrici snižoval. Nejnižších hodnot dosahoval při nejvyšším plnění (30 % kaučuku), a to hodnotou 1,95 GPa. Tato hodnota značí pokles modulu cca o 62 % vůči referenčnímu epoxidu. Naopak u referenční směsi a směsi s nízkým množstvím plniva (1 % kaučuku) bylo dosaženo stejných hodnot. Z výsledných hodnot na obrázku č. 26 lze usoudit, že se zvyšujícím se podílem kaučuku se dle předpokladu snižuje modul pružnosti a tím i tuhost takto plněné matrice.

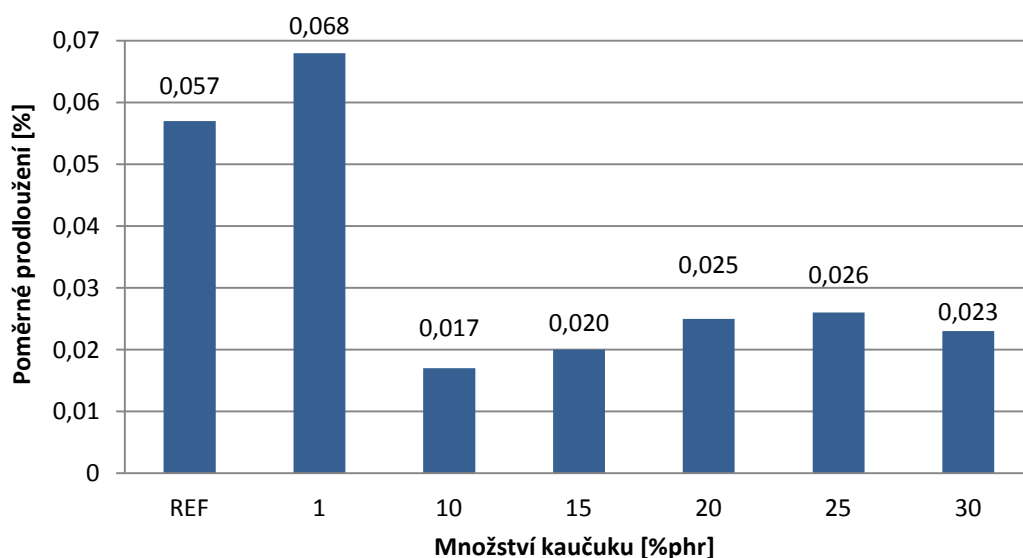
Výsledky jsou znázorněny na obrázku 26 a souhrnné hodnoty jsou v příloze 3 a 4.



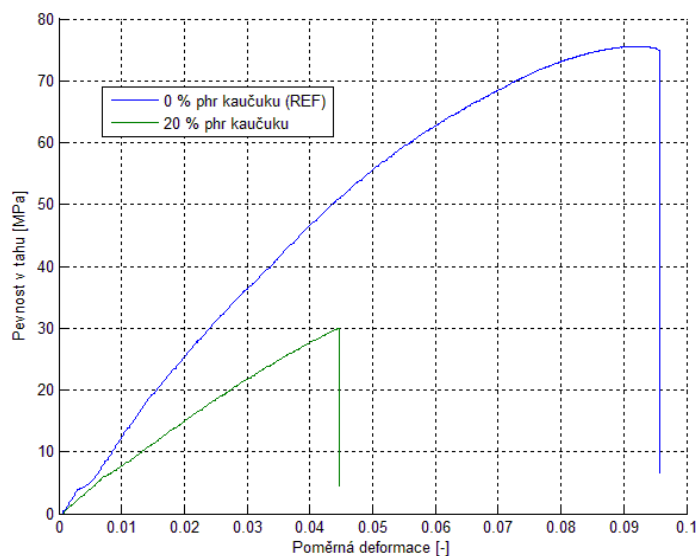
Obrázek 26: Výsledné průměrné hodnoty modulu pružnosti při různém plnění epoxidu kaučukem

8.1.3 Poměrné prodloužení

Největších hodnot poměrného prodloužení bylo dosaženo u vzorku s plněním 1 % kaučuku (0,068) a v případě referenčního vzorku (0,057). Nejnižší hodnotu poměrného prodloužení však vykazoval vzorek při množství 10 % kaučuku, a to 0,017. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze 5 a 6.



Obrázek 27: Výsledné průměrné hodnoty poměrného prodloužení při různém plnění epoxidu kaučukem

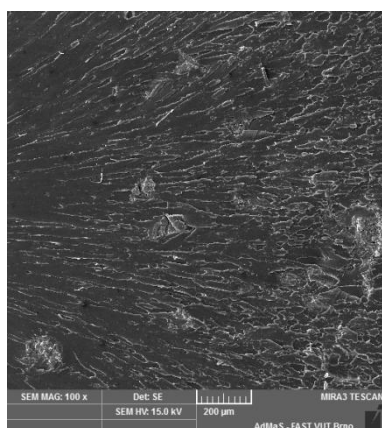


Obrázek 28: Grafické porovnání tahových diagramů vzorků s rozdílným množstvím kaučuku v matrici

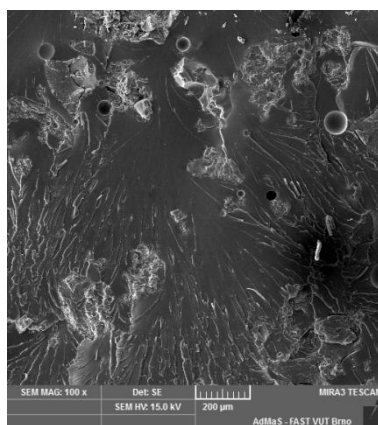
8.1.4 Analýza lomové plochy epoxidového lepidla modifikovaného kaučukem pomocí SEM

Skenovací elektronová analýza byla provedena na vzorcích s různým podílem plniva (kaučuku), a to přesně s 10; 20 a 30 % kaučuku pro ověření disperze plniva v matrici.

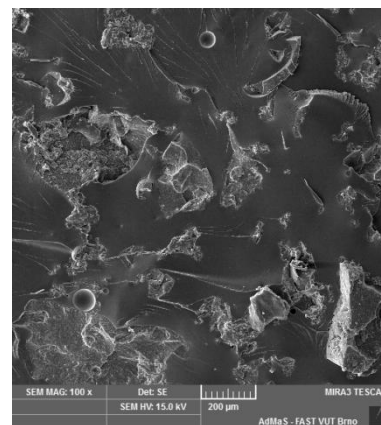
Již z vizuálního posouzení byl patrný malý výskyt vzduchových pórů, a to jak u směsi s 20 % kaučuku v epoxidu, tak i u směsi 30 % kaučuku v epoxidu. To se potvrdilo i na snímcích ze skenovacího elektronového mikroskopu, kde se zkoumala lomová plocha vzorku. Snímky jsou zobrazeny na obrázku 30 a 31. Na těchto obrázcích je také patrná i dispergace kaučukových zrn v matrici a rozdílné plnění směsi tímto plnivem.



Obrázek 29: Epoxid s 10 % kaučuku (100x)

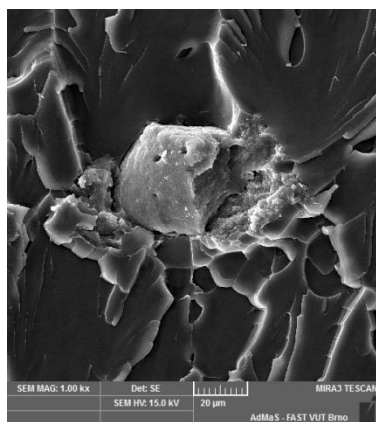


Obrázek 30: Epoxid s 20 % kaučuku (100x) se vzduchovými póry

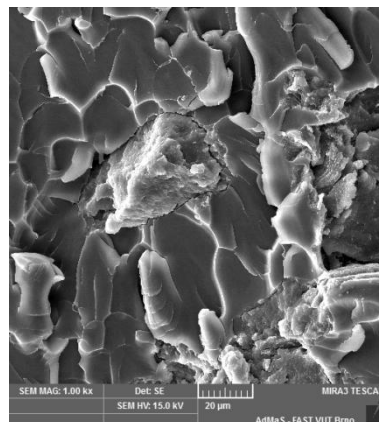


Obrázek 31: Epoxid s 30 % kaučuku (100x) se vzduchovými póry

Z obrázku 32 je patrné, že byl vzorek porušen v místě epoxidové matrice, nikoliv v zrně kaučuku. Dále byla pozorována struktura lomu. Na obrázku 33 je zřejmá četná míra porušení epoxidové matrice a znatelně křehčí lom než v případě 10 % phr kaučuku.



Obrázek 32: Epoxid s 10 %
kaučuku (1000x)

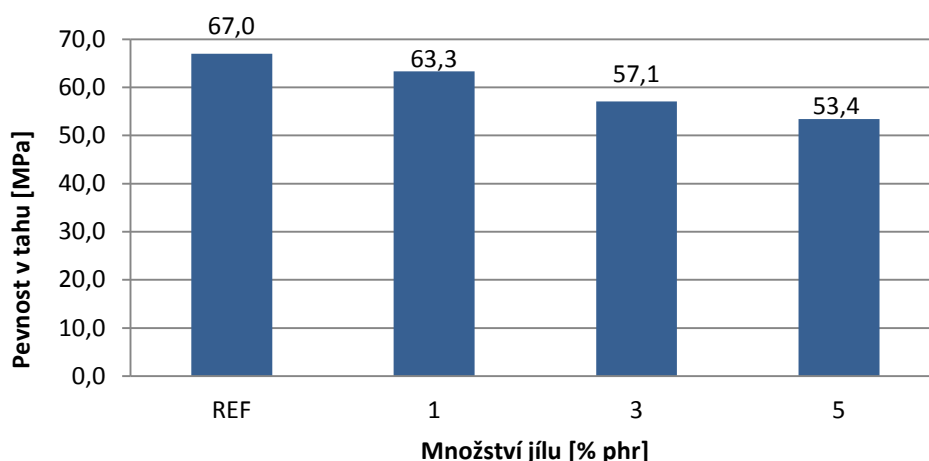


Obrázek 33: Epoxid s 20 %
kaučuku (1000x)

8.2 Vliv různého množství jílů v epoxidu

8.2.1 Pevnost v tahu

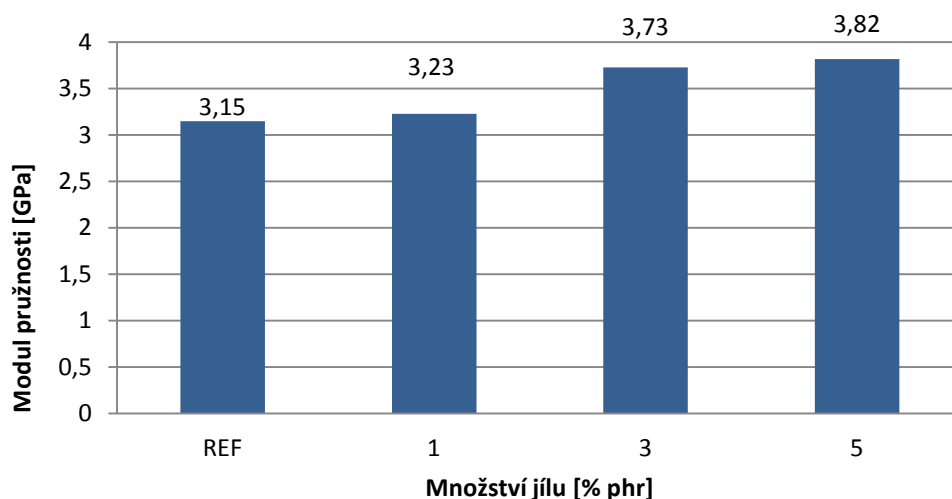
Na vzorcích s odlišným množstvím plnění jílu se zjišťovala pevnost v tahu. Výsledné hodnoty získaných pevností jsou zřejmé z obrázku č. 34. Nejvyšší pevnost v tahu byla u plněných vzorku s nejmenším podílem plniva, jejíž hodnota byla přibližná pevnosti v tahu vzorku referenčního. Nejnižší hodnotu pevnosti v tahu však vykazovala směs při plnění epoxidu 5 % jílu. Pokles pevnosti takto plněného epoxidu od referenčního vzorku byl zhruba o 20 %. Souhrnné výsledky jsou uvedeny v příloze 7.



Obrázek 34: Výsledné průměrné hodnoty pevnosti v tahu při různém plnění epoxidu jílem

8.2.2 Modul pružnosti

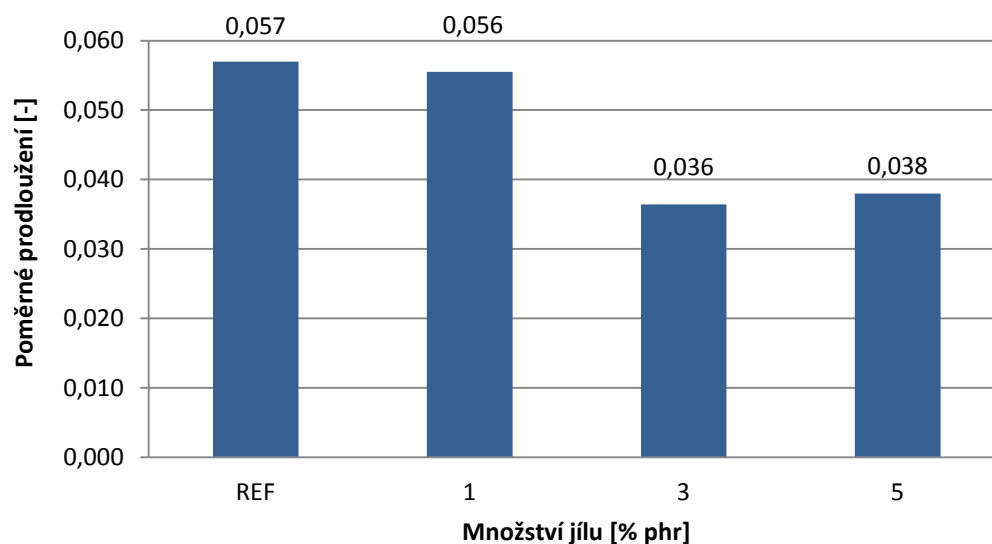
Modul pružnosti se s větším podílem jílu v matrici zvyšoval. Nejnižších hodnot dosahoval v případě referenčního vzorku, a to hodnotou 3,15 GPa. Naopak u směsi s množstvím 3 a 5 % phr plniva bylo dosaženo nejvyšších hodnot modulu pružnosti a to až o 21 % referenčního vzorku. Z výsledných hodnot na obrázku č. 35 lze usoudit, že se zvyšujícím se podílem jílu se zvyšuje i modul pružnosti a tím i tuhost takto plněné matrice. Souhrnné hodnoty jsou v příloze 8.



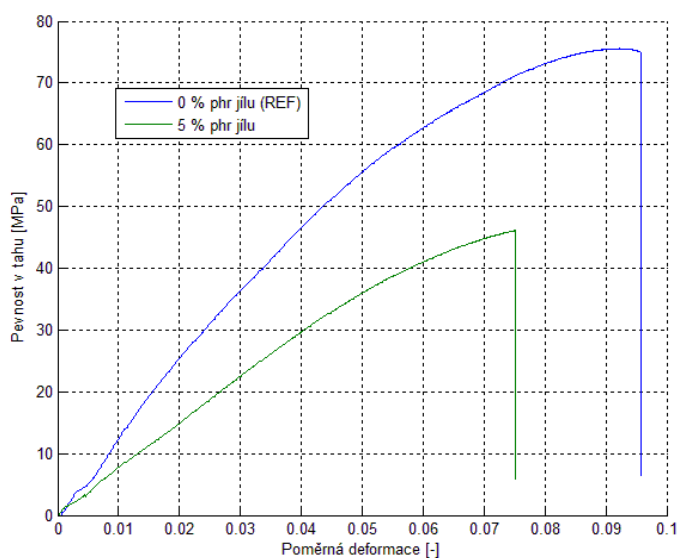
Obrázek 35: Výsledné hodnoty modulu pružnosti při různém plnění epoxidu jílem

8.2.3 Poměrné prodloužení

Největších hodnot poměrného prodloužení bylo dosaženo u vzorku referenčního (0,057) a vzorku plněného 1 % jílů (0,056). Nejnižší hodnotu poměrného prodloužení však vykazoval vzorek při množství 3 % jílů, a to 0,036. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze 9.



Obrázek 36: Výsledné průměrné hodnoty poměrného prodloužení při různém plnění epoxidu jílem

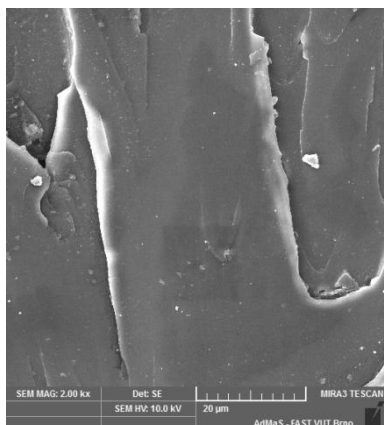


Obrázek 37: Grafické porovnání tahových diagramů vzorků s rozdílným množstvím jílu v matrici

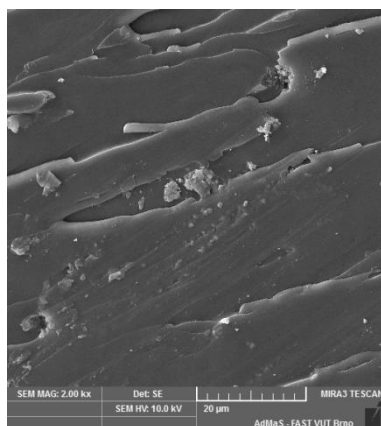
8.2.4 Analýza lomové plochy epoxidového lepidla modifikovaného organickým plnivem (jílem) pomocí SEM

Skenovací elektronová analýza byla provedena na vzorcích s různým podílem plniva (jílu), a to přesně s 1, 3 a 5 % jílu pro ověření disperze plniva v matrici.

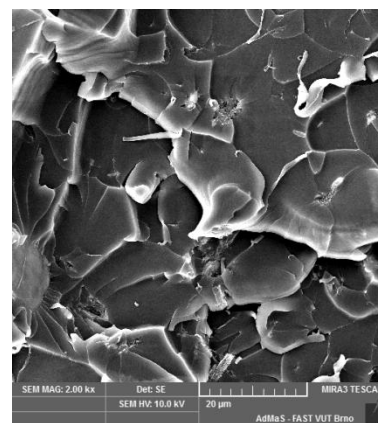
Dispergace jílu v epoxidové matrici nebyla úplná z důvodu nedokonalého rozemletí jílových zrn, která následně tvořila shluky. Rozdílné dávkování jílu do epoxidu a případné shluky jsou patrné na snímcích 38 až 40.



Obrázek 38: Epoxid s 1 % jílu
(2000x)

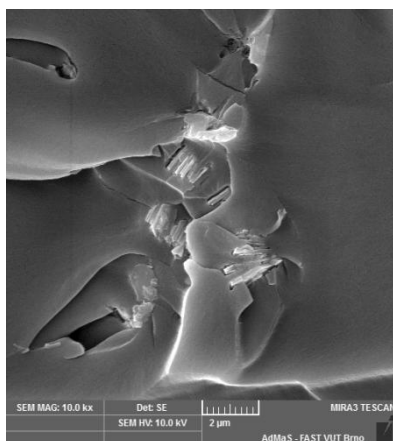


Obrázek 39: Epoxid s 3 % jílu
(2000x)

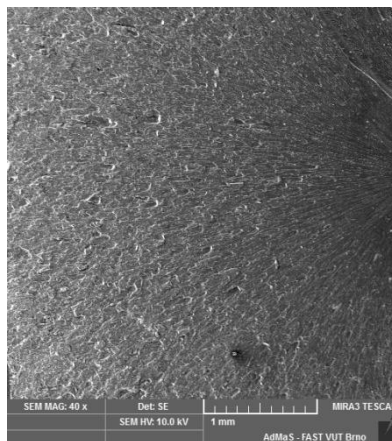


Obrázek 40: Epoxid s 5 % jílu
(2000x)

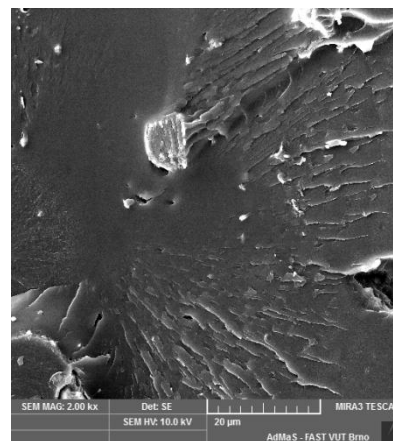
Lom vzorku nastal v místě, kde se vyskytovalo největší množství jílových částic a to jak v případě směsi s 3 % jílu, tak i směsi s 5 % jílu. Vzniklé místo s vyšší koncentrací napětí projevující se četným výskytem trhlin na lomové ploše je vyobrazeno na obrázcích 41 a 43.



Obrázek 41: Shluk jílových zrn
v matrici s 3 % jílu (10000x)



Obrázek 42: Místo vzniku lomu,
v místě největšího množství
jílových částic (vpravo), 3 % jílu
(40x)



Obrázek 43: Místo vzniku lomu
(vlevo) a vytvořený shluk
jílových částic, 5 % jílu (2000x)

9 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla modifikace epoxidového lepidla, která by zvýšila duktilní vlastnosti lepidla, a tím by se zvýšila i trvanlivost systému FRP/dřevo. V teoretické části jsem se věnovala procesům lepení dřevěných nosných prvků, základnímu rozdělení lepidel používaných pro dřevěné nosné konstrukce a možnými způsoby modifikace epoxidových lepidel různými typy částicového plniva.

Pro modifikaci epoxidových pryskyřic byl v rámci experimentu použit kaučuk a jíl, obě dvě plniva ve velikosti zrn v řádech mikrometrů. Množství **kaučuku** v epoxidové matrici bylo zvoleno 0, 1, 10, 15, 20, 25 a 30 % phr, příprava směsi se prováděla pomocí ultrazvukového homogenizátoru pro dosažení dostatečné dispergace kaučuku v epoxidové pryskyřici, příp. k zabránění vzniku vzduchových pórů ve směsi. U vzorků modifikovaných epoxidových lepidel nebyl potvrzen předpoklad, že v případě použití elastomerického plniva vzrostou jeho duktilní vlastnosti. Z vyhodnocení vyplývá, že s vyšším množstvím kaučuku se významně snížily všechny sledované pevnostní parametry směsí. V případě organického plniva (**jílu**) bylo pro modifikaci epoxidového lepidla zvoleno množství ve výši 1, 3 a 5 % phr z polymerní matrice. V případě této modifikace epoxidů pevnosti se vzrůstajícím množstvím jílu v matrici klesaly, stejně jako poměrné prodloužení. Nicméně jejich pokles nebyl tak výrazný, jako v případě použitého elastomeru. Naopak hodnota modulu pružnosti se zvýšila a modifikované epoxidové směsi vykazaly vyšší tuhost oproti referenčnímu epoxidovému vzorku.

Na závěr byla provedena elektronová analýza lomových ploch vzorků epoxidu. V obou dvou případech použitých plniv bylo zjištěno, že velikost zrn v mikroúrovni způsobilo při vyšších hodnotách plnění zvýšená místa koncentrace napětí, která se projevovala čtenějším výskytem trhlin lomové plochy.

Tato práce potvrdila, že velikost plniva hraje důležitou roli a do budoucího experimentu je třeba zajistit takovou modifikaci epoxidových lepidel, které by byly aplikovány v nanoměřítku a jež by byly schopny zvýšit pevnostní a duktilní parametry epoxidu. Pak by takto plněný epoxid byl vhodný i pro aplikační využití v případě FRP/dřevěných systémů.

10 LITERATURA

- [1] **Eisner, K., Havlíček, V. a Osten, M.** *Dřevo a plasty*. Praha : SNTL - nakladatelství technické literatury, 1983. str. 384.
- [2] **Eisner, K., Havlíček, V., Osten, M.** *Dřevo a plasty*. Praha : SNTL- nakladatelství technické literatury, 1983. str. 384.
- [3] **Osten, M.** *Práce s lepidly a tmely*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982. str. 288.
- [4] **Moore, W. J.** *Fyzikální chemie*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [5] **Rowell, R. M.** *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Florida : CRC Press, 2005. ISBN 0849315883.
- [6] **Lidařík, M., Kincl, J., Roth, V., Bring, A.** *Epoxydové pryskyřice*. Bratislava : Státní nakladatelství technické literatury, 1961. str. 292. Sv. 6.
- [7] **Drochytka, R.** *Plastické látky ve stavebnictví*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 1998. str. 122. ISBN 80-214-1148-1.
- [8] **Šubrt, K.** *Návrh zařízení pro měření smáčivosti povrchů*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. str. 60. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D..
- [9] **Svoboda, J.** *Studie vlivu povrchové energie různých druhů kapalin a povrchů - experiment*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. str. 47. Vedoucí bakalářské práce Ing. Simona Fialová, Ph.D..
- [10] **Krásný, I.** *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2010. str. 126. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D..
- [11] **Vinter, Bohuslav.** SlidePlayer. [Online] <http://slideplayer.cz/slide/3296433/>.
- [12] Pedagogická fakulta, Masarykova univerzita Brno. *Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání,* *sekce* *chemie.* [Online] http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hoppleruv_viskozimetr.htm.
- [13] For Dictionary of Scientific & Technical Terms. *Falling Ball Viscometer*. [Online] 2003. <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Falling+Ball+Viscometer>.
- [14] Axson Technologies. *EPOLAM 2017*. [Online] http://www.axson-technologies.com/sites/default/files/EPOLAM%202017%20EXTERNAL%203_0.pdf.

- [15] MATEST. *Air Jet Sieving machine*. [Online] <http://matest.com/es/Products/secados/SIEVE-SHAKERS/sieve-shakers-0/a058-05n-air-jet-sieving-machine-0>.
- [16] J., Nebesářová. Skanovací elektronový mikroskop. *Elektronová mikroskopie pro biology*. [Online] 2001. <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.0.html>.
- [17] Omrani, A., Simon L. C., Rostami A. A. Materials science & engineering. *Influences of cellulose nanofiber on the epoxy network formation*. [Online] 2008. http://ac.els-cdn.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0921509308000075/1-s2.0-S0921509308000075-main.pdf?_tid=62ba500e-1e92-11e6-92bf-00000aacb362&acdnat=1463752655_f732f7767e7af012bc2d1330ee255bdb.
- [18] Chapter 8: Literature Review of Epoxy Toughening. *VirginiaTech: Difital Library and Archives*. [Online] <https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-32398-61326/unrestricted/8-9.pdf>.
- [19] Campilho, R.D.S.G., a další. Science direct. *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. [Online] Červenec 2013. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813000437>. ISSN 1359-8368.
- [20] Anderson, T.L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. místo neznámé : Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2005. str. 640. ISBN 0849316561.
- [21] Gabr, M.H., a další. ScienceDirect. *Effect of microfibrillated cellulose on mechanical properties*. [Online] 21. Prosinec 2009. http://ac.els-cdn.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/S0263822309005224/1-s2.0-S0263822309005224-main.pdf?_tid=572e9570-1f77-11e6-aa48-00000aab0f6b&acdnat=1463850990_c277da3fd2b9fe4f895fc0d488841643.

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	<i>Vliv hodnoty pH na reaktivitu rezorcín–formaldehydových lepidel</i>
Obrázek 2	<i>Druhy epoxidových pryskyřic obsahující glycidové skupiny</i>
Obrázek 3	<i>Druhy epoxidových pryskyřic obsahujících epoxidové skupiny</i>
Obrázek 4	<i>Schéma přípravy epoxidových pryskyřic</i>
Obrázek 5	<i>Konstrukční typy plochých spojů</i>
Obrázek 6	<i>Znázornění způsobů aplikace lepicí směsi</i>
Obrázek 7	<i>Rozdělení kapalin dle smáčivosti na základě kontaktního úhlu</i>
Obrázek 8	<i>Zjednodušené znázornění tečného napětí při pohybu tekutiny</i>
Obrázek 9	<i>Zjednodušené schéma Höpplerova viskozimetru</i>
Obrázek 10	<i>Zatěžovací módy</i>
Obrázek 11	<i>Grafické znázornění křivky zrnitosti kaučuku</i>
Obrázek 12	<i>Jílovitý prášek tvořící shluky jednotlivých zrníček jílu</i>
Obrázek 13	<i>Shluky jílovitých zrníček</i>
Obrázek 14	<i>Nahřívání epoxidového lepidla</i>
Obrázek 15	<i>Nastavení ultrazvuku</i>
Obrázek 16	<i>Sestava ultrazvuku</i>
Obrázek 17	<i>Silikonová forma vylitá směsí</i>
Obrázek 18	<i>Dispergace jílu a epoxidu</i>
Obrázek 19	<i>Sestava ultrazvuku při dispergaci jílu</i>
Obrázek 20	<i>Tvar a rozměry zkušební vzorku</i>
Obrázek 21	<i>Uchopení vzorků do upínacích čelistí a porušení v pracovní části</i>
Obrázek 22	<i>Vzhled a typ porušení vzorku – 5 % jílu</i>
Obrázek 23	<i>Vzhled a typ porušení vzorku – 10 % jílu</i>
Obrázek 24	<i>Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XM</i>
Obrázek 25	<i>Výsledné průměrné hodnoty pevností v tahu při různém plnění epoxidu kaučukem</i>
Obrázek 26	<i>Výsledné průměrné hodnoty modulu pružnosti při různém plnění epoxidu kaučukem</i>
Obrázek 27	<i>Výsledné průměrné hodnoty poměrného prodloužení při různém plnění epoxidu kaučukem</i>

- Obrázek 28 *Grafické porovnání tahových diagramů vzorků s rozdílným množstvím kaučuku v matrici*
- Obrázek 29 *Epoxid s 10 % kaučuku*
- Obrázek 30 *Epoxid s 20 % kaučuku se vzduchovými póry*
- Obrázek 31 *Epoxid s 30 % kaučuku se vzduchovými póry*
- Obrázek 32 *Epoxid s 10 % kaučuku*
- Obrázek 33 *Epoxid s 20 % kaučuku*
- Obrázek 34 *Výsledné průměrné hodnoty pevnosti v tahu při různém plnění epoxidu jilem*
- Obrázek 35 *Výsledné hodnoty modulu pružnosti při různém plnění epoxidu jilem*
- Obrázek 36 *Výsledné průměrné hodnoty poměrného prodloužení při různém plnění epoxidu jilem*
- Obrázek 37 *Grafické porovnání tahových diagramů vzorků s rozdílným množstvím jilu v matrici*
- Obrázek 38 *Epoxid s 1 % jilu*
- Obrázek 39 *Epoxid s 3 % jilu*
- Obrázek 40 *Epoxid s 5 % jilu*
- Obrázek 41 *Shluk jílových zrn v matrici se 3 % jilu*
- Obrázek 42 *Místo vzniku lomu, v místě největšího množství jílových částic (vpravo), 3 % jilu*
- Obrázek 43 *Místo vzniku lomu (vlevo) a vytvořený shluk jílových částic, 5 % jilu*

12 SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1	<i>Vhodnost současných lepidel pro nosné dřevěné prvky dle EN 301</i>
Tabulka č. 2	<i>Klasifikační třídy lepidel podle EN 301</i>
Tabulka č. 3	<i>Rychlost vytvrzení rezorcín-formaldehydové pryskyřice v závislosti na hodnotě pH a na teplotě</i>
Tabulka č. 4	<i>Efektivita základních typů plochých spojů</i>
Tabulka č. 5	<i>Fyzikální vlastnosti EPOLAM 2017 RESIN</i>
Tabulka č. 6	<i>Mechanické vlastnosti EPOLAM 2017 HARDENER při teplotě 23 °C po vytvrzení</i>
Tabulka č. 7	<i>Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kaučuku</i>
Tabulka č. 8	<i>Složení směsí pro dané množství kaučuku</i>
Tabulka č. 9	<i>Složení směsí pro dané množství organického plniva – jílů</i>

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

značka	jednotka	popis
a	[mm]	tloušťka jednoho lepeného dílce
b	[mm]	tloušťka druhého lepeného dílce
dv/dy	[s ⁻¹]	rychlostní spád
f	[MPa]	pevnost ve smyky použitého lepidla
F	[MPa]	pevnost v tahu spojovaného materiálu
K	[m ² ·s ⁻²]	konstanta použité kuličky
L_p	[mm]	minimální délka přeplátovaného spoje
t	[s]	doba pádu kuličky
v	[m·s ⁻¹]	rychlost proudění
y	[m]	poloha ve směru kolmém na rychlost proudění
γ_{lg}	[°]	úhel mezi kapalnou a plynnou fází
γ_{ls}	[°]	úhel mezi kapalnou a pevnou fází
γ_{sg}	[°]	úhel mezi pevnou a plynnou fází
η	[Pa·s]	dynamická viskozita
ν	[m ² ·s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota média
ρ_k	[kg·m ⁻³]	hustota kuličky
ρ_l	[kg·m ⁻³]	hustota lepidla
τ	[Pa]	tečné napětí

14 PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Pevnost v tahu epoxidů s různým množstvím kaučuku (0; 1; 10; 15 % phr)

Množství kaučuku ve směsi	Označení	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Plocha [mm ²]	Síla [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Výsledná pevnost v tahu [MPa]
REF	1	4,73	10,22	48,34	3234,95	66,9	67,0
	2	4,76	9,93	47,27	3572,10	75,6	
	3	4,57	10,03	45,84	3425,50	74,7	
	4	4,45	9,85	43,83	3327,35	75,9	
	5	5,02	10,47	52,56	3228,75	61,4	
	6	4,32	9,79	42,29	2002,05	47,3	
1 % phr	1	3,60	9,48	34,13	1159,80	34,0	40,0
	2	4,68	10,21	47,78	2140,60	44,8	
	3	4,28	10,19	43,61	2261,40	51,9	
	4	4,66	9,90	46,13	1622,00	35,2	
	5	4,50	9,84	44,28	1923,10	43,4	
	6	4,05	9,98	40,42	1241,55	30,7	
10 % phr	1	4,48	9,86	44,17	1235,80	28,0	30,6
	2	4,33	9,84	42,61	1531,10	35,9	
	3	4,55	9,88	44,95	1574,35	35,0	
	4	4,55	9,91	45,09	1194,70	26,5	
	5	4,76	10,12	48,17	1558,75	32,4	
	6	4,60	9,98	45,91	1183,05	25,8	
15 % phr	1	4,08	9,83	40,11	1248,15	31,1	30,8
	2	4,64	9,91	45,98	1449,30	31,5	
	3	4,19	9,80	41,06	1213,95	29,6	
	4	4,18	9,84	41,13	1282,70	31,2	
	5	4,08	9,79	39,94	1256,50	31,5	
	6	5,07	10,10	51,21	1536,20	30,0	

Příloha č. 2: Pevnost v tahu epoxidů s různým množstvím kaučuku (20; 25 a 30 % phr)

Množství kaučuku ve směsi	Označení	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Plocha [mm ²]	Síla [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Výsledná pevnost v tahu [MPa]
20 % phr	1	4,35	9,84	42,80	1315,80	30,7	31,9
	2	4,15	9,84	40,84	1222,30	29,9	
	3	4,08	9,83	40,11	1393,25	34,7	
	4	4,15	9,87	40,96	1299,80	31,7	
	5	4,23	9,85	41,67	1271,75	30,5	
	6	4,16	9,78	40,68	1376,15	33,8	
25 % phr	1	4,20	9,72	40,82	1320,15	32,3	30,8
	2	4,13	9,80	40,47	1202,70	29,7	
	3	4,02	9,78	39,32	1186,30	30,2	
	4	4,43	9,83	43,55	1436,90	33,0	
	5	4,10	9,76	40,02	1239,80	31,0	
	6	4,31	9,80	42,24	1210,35	28,7	
30 % phr	1	4,26	9,89	42,13	1105,25	26,2	27,0
	2	4,03	9,85	39,70	1047,40	26,4	
	3	4,10	9,80	40,18	1165,25	29,0	
	4	3,99	9,83	39,22	870,30	22,2	
	5	4,10	9,88	40,51	1120,50	27,7	
	6	4,17	9,99	41,66	1262,00	30,3	

Příloha č. 3: Modul pružnosti epoxidů s různým množstvím kaučuku (0; 1; 10; 15 % phr)

Množství kaučuku ve směsi	Označení	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Plocha [mm ²]	Modul pružnosti [MPa]	Výsledný modul pružnosti [GPa]
REF	1	4,73	10,22	48,34	3240,30	3,15
	2	4,76	9,93	47,27	3031,72	
	3	4,57	10,03	45,84	3052,64	
	4	4,45	9,85	43,83	3290,90	
	5	5,02	10,47	52,56	2903,68	
	6	4,32	9,79	42,29	3400,40	
1 % phr	1	3,60	9,48	34,13	3039,38	3,12
	2	4,68	10,21	47,78	2580,58	
	3	4,28	10,19	43,61	2796,99	
	4	4,66	9,90	46,13	3161,93	
	5	4,50	9,84	44,28	3403,63	
	6	4,05	9,98	40,42	3734,94	
10 % phr	1	4,48	9,86	44,17	2754,60	2,70
	2	4,33	9,84	42,61	2718,35	
	3	4,55	9,88	44,95	2829,16	
	4	4,55	9,91	45,09	2589,54	
	5	4,76	10,12	48,17	2351,51	
	6	4,60	9,98	45,91	2963,98	
15 % phr	1	4,08	9,83	40,11	2476,11	2,48
	2	4,64	9,91	45,98	2633,65	
	3	4,19	9,80	41,06	2493,27	
	4	4,18	9,84	41,13	2436,49	
	5	4,08	9,79	39,94	2309,25	
	6	5,07	10,10	51,21	2555,50	

Příloha č. 4: Modul pružnosti epoxidů s různým množstvím kaučuku (20; 25 a 30% phr)

Množství kaučuku ve směsi	Označení	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Plocha [mm ²]	Modul pružnosti [MPa]	Výsledný modul pružnosti [GPa]
20 % phr	1	4,35	9,84	42,80	2162,96	2,22
	2	4,15	9,84	40,84	2009,78	
	3	4,08	9,83	40,11	2175,74	
	4	4,15	9,87	40,96	2304,58	
	5	4,23	9,85	41,67	2240,49	
	6	4,16	9,78	40,68	2440,85	
25 % phr	1	4,20	9,72	40,82	2146,12	2,2
	2	4,13	9,80	40,47	2260,28	
	3	4,02	9,78	39,32	2079,00	
	4	4,43	9,83	43,55	2248,95	
	5	4,10	9,76	40,02	2187,35	
	6	4,31	9,80	42,24	2283,17	
30 % phr	1	4,26	9,89	42,13	2028,42	1,95
	2	4,03	9,85	39,70	1965,31	
	3	4,10	9,80	40,18	2006,66	
	4	3,99	9,83	39,22	1796,47	
	5	4,10	9,88	40,51	1944,27	
	6	4,17	9,99	41,66	1950,94	

Příloha č. 5: Poměrné prodloužení epoxidů s různým množstvím kaučuku (0; 1; 10; 15 % phr)

Množství kaučuku ve směsi	Označení	Prodloužení [mm]	Poměrné prodloužení [%]	Výsledné poměrné prodloužení [%]
REF	1	4,72	6,46	5,7
	2	4,43	6,07	
	3	4,97	6,79	
	4	5,23	7,14	
	5	3,28	4,54	
	6	2,45	3,44	
1 % phr	1	1,52	2,19	6,8
	2	3,41	4,72	
	3	3,6	4,97	
	4	1,34	1,95	
	5	16,07	21,6	
	6	4,02	5,53	
10 % phr	1	1,04	1,55	1,7
	2	1,67	2,39	
	3	1,34	1,96	
	4	0,93	1,41	
	5	1,26	1,84	
	6	0,87	1,33	
15 % phr	1	1,43	2,07	2,0
	2	1,46	2,11	
	3	1,30	1,89	
	4	1,24	1,82	
	5	1,55	2,23	
	6	1,44	2,09	

Příloha č. 6: Poměrné prodloužení epoxidů s různým množstvím kaučuku (20; 25 a 30 % phr)

Množství kaučuku ve směsi	Označení	Prodloužení [mm]	Poměrné prodloužení [%]	Výsledné poměrné prodloužení [%]
20 % phr	1	1,74	2,49	2,5
	2	1,75	2,50	
	3	2,08	2,94	
	4	1,68	2,40	
	5	1,54	2,22	
	6	1,71	2,45	
25 % phr	1	1,97	2,80	2,6
	2	1,63	2,34	
	3	1,99	2,82	
	4	1,97	2,80	
	5	1,91	2,72	
	6	1,54	2,23	
30 % phr	1	1,62	2,33	2,3
	2	1,45	2,10	
	3	1,59	2,29	
	4	1,20	1,76	
	5	1,77	2,53	
	6	1,95	2,77	

Příloha č. 7: Pevnost v tahu epoxidů s různým množstvím organického plniva - jílů (1; 3; 5 % phr)

Množství jílů ve směsi	Označení	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Plocha [mm ²]	Síla [N]	Pevnost v tahu [MPa]	Výsledná pevnost v tahu [MPa]
1 % phr	1	4,44	10,43	46,31	3132,80	67,6	63,3
	2	3,91	10,18	39,80	2019,20	50,7	
	3	4,12	9,77	40,25	2676,40	66,5	
	4	4,14	9,68	40,08	3006,95	75,0	
	5	3,86	9,59	37,02	2299,25	62,1	
	6	4,01	9,77	39,18	2269,05	57,9	
3 % phr	1	3,97	9,68	38,43	2119,25	55,1	57,1
	2	4,01	9,51	38,14	2238,15	58,7	
	3	3,96	9,88	39,12	2315,95	59,2	
	4	4,13	9,69	40,02	2022,45	50,5	
	5	3,86	9,65	37,25	2393,80	64,3	
	6	4,20	9,62	40,40	2218,50	54,9	
5 % phr	1	5,27	10,14	53,44	2463,60	46,1	53,4
	2	4,13	10,05	41,51	1853,35	44,7	
	3	4,31	9,96	42,93	2194,50	51,1	
	4	3,91	9,62	37,61	2250,15	59,8	
	5	4,36	9,51	41,46	2640,40	63,7	
	6	3,98	9,66	38,45	2109,40	54,9	

Příloha č. 8: Modul pružnosti epoxidů s různým množstvím organického plniva - jílů (1; 3; 5 % phr)

Množství kaučuku ve směsi	Označení	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Plocha [mm²]	Modul pružnosti [MPa]	Výsledný modul pružnosti [GPa]
1 % phr	1	4,44	10,43	46,31	2865,26	3,23
	2	3,91	10,18	39,80	2914,29	
	3	4,12	9,77	40,25	3460,63	
	4	4,14	9,68	40,08	3891,18	
	5	3,86	9,59	37,02	3124,47	
	6	4,01	9,77	39,18	3111,84	
3 % phr	1	3,97	9,68	38,43	3606,9	3,73
	2	4,01	9,51	38,14	3366,8	
	3	3,96	9,88	39,12	3994,17	
	4	4,13	9,69	40,02	3647,15	
	5	3,86	9,65	37,25	3427,57	
	6	4,20	9,62	40,40	4365,01	
5 % phr	1	5,27	10,14	53,44	2445,3	3,82
	2	4,13	10,05	41,51	3061,22	
	3	4,31	9,96	42,93	3323,78	
	4	3,91	9,62	37,61	3590,84	
	5	4,36	9,51	41,46	3593,69	
	6	3,98	9,66	38,45	6901,64	

Příloha č. 9: Poměrné prodloužení epoxidů s různým množstvím organického plniva - jílů (1; 3; 5 % phr)

Množství kaučuku ve směsi	Označení	Prodloužení [mm]	Poměrné prodloužení [%]	Výsledné poměrné prodloužení [%]
1 % phr	1	3,86	5,32	5,5
	2	2,6	3,64	
	3	4,27	5,87	
	4	4,85	6,63	
	5	4,02	5,52	
	6	4,61	6,31	
3 % phr	1	2,5	3,5	3,6
	2	2,55	3,57	
	3	3,02	4,19	
	4	1,73	2,47	
	5	3,6	4,97	
	6	2,25	3,16	
5 % phr	1	3	4,16	3,8
	2	4,27	5,87	
	3	2,08	2,94	
	4	2,44	3,42	
	5	3,25	4,5	
	6	1,32	1,92	