



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIUM ODOLNOSTI LEPENÉ SPÁRY DŘEVA PROTI VYŠŠÍM TEPLOTÁM

STUDY OF DURABILITY OF WOOD GLUE BONDS AGAINST INCREASED TEMPERATURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Kučera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Vít Kučera
Název	Studium odolnosti lepené spáry dřeva proti vyšším teplotám
Vedoucí práce	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

KLIPPEL, M. Fire safety of bonded structural timber elements. Bericht IBK Nr. 359, 2014 Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich

KÖNIG, J., NORÉN, J., STERLEY, M. Effect of adhesives on finger joint performance in fire. In: Proceedings of 41th CIB-W18 Meeting, Paper CIB-W18/41-16-1, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 2008

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

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

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

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současnosti existují postupy návrhu dřevěných prvků na požární odolnost, nejčastěji podle zjednodušeného modelu požáru definovaného v ČSN EN 1991-1-2. Vliv lepidla u lepených nosných prvků na hodnotu požární odolnosti není znám, chybějí zejména experimentálně zjištěná data z požárních zkoušek při použití různých typů lepidel. Předpokládá se, že vliv lepené spáry není signifikantní na výslednou požární odolnost.

V rámci diplomové práce budou v teoretické části popsány základní normativní postupy, kterými se zjišťuje odolnost lepené spáry při zvýšené teplotě. Pozornost bude zaměřena zejména na předběžné postupy stanovené pracovní skupinou CEN TC 193/SC1/WG13 a rovněž popsán vliv velikosti normativních zkušebních těles na výslednou hodnotu odolnosti. Dále bude provedena rešerše stávajících experimentálních prací vztahujících se k odolnosti lepené spáry proti vyšším teplotám, které byly provedeny pro různé typy lepidel.

V praktické části pak bude přistoupeno k experimentálnímu posouzení vlivu druhu lepidla (formaldehydová báze, PUR, EPI) na odolnost lepeného spoje při vyšší teplotě. Lepené spoje budou podrobeny postupné teplotní expozici, aby bylo možné sestavit závislost vlivu teploty na výsledné pevnosti lepeného spoje dle druhu lepidla.

Experimentálně zjištěná závislost odolnosti lepeného spoje při různé teplotní expozici pro různé druhy lepidla se jeví jako zásadní. Dosažené hodnoty poklesu pevnosti lepeného sortimentu vlivem degradace lepené spáry mohou být výrazně nižší než redukované pevnosti zjištěné numericky dle normového postupu.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

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

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

ABSTRAKT

V současné době jsou pro návrh dřevěných prvků k dispozici zjednodušené postupy modelování požáru, které definuje ČSN EN 1991-1-2. Není však experimentálně ověřen vliv použitého adheziva na výslednou hodnotu požární odolnosti lepených dílců. Tato diplomová práce řeší základní normativní postupy, které by mohli objasnit odolnost lepené spáry proti zvýšeným teplotám. V praktické části bude přistoupeno k experimentálnímu posouzení vlivu druhu lepidla na různé bázi (epoxid, formaldehyd, PUR a EPI) na odolnost lepeného spáry proti zvýšené teplotě. Lepené spoje budou podrobeny postupné teplotní expozici, aby bylo možno sestavit závislost vlivu teploty na výsledné pevnosti tohoto spoje dle typu adheziva.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lepený spoj, lepená spára, lepidlo, dřevěný adherend, požární odolnost, kohezní porušení, pevnost v ohybu.

ABSTRACT

In this time are for design of wooden elements available simplified procedures for fire modeling which defines ČSN EN 1991-1-2. But it is not experimentally tested the impact of adhesive on the final value of fire resistance of laminated panels. This diploma thesis solves basic normative practices that could explain the durability of glue bond against increased temperatures. in the practical part will be undertaken to experimentally assess the impact of various kinds of adhesive-based (epoxy, formaldehyde, PUR and EPI) on the glued bond durability against increased temperature. Glued joints that will be subjected to gradual temperature exposure in order to assemble the dependence of the temperature influence on the final strength of the joint according to the type of adhesive.

KEYWORDS

Glued joint, bondline, adhesive, wood adherend, fire resistance, wood failure, flexural strenght.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Vít Kučera *Studium odolnosti lepené spáry dřeva proti vyšším teplotám*. Brno, 2017. 67 s., 20 s. příl. Diplomová 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 diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Vít Kučera
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Velké poděkování patří především vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za trpělivost, rady a odborné vedení při zpracování dané problematiky této diplomové práce. V neposlední řadě pak rodině, zaměstnancům VUT FAST Brno a všem, kteří mě během celého studia podporovali.

Obsah

1. Úvod	11
2. Chemické složení dřeva	12
2.1. Přehled jednotlivých chemických složek dřeva	12
2.1.1. Makromolekulární látky	12
2.1.2. Látky s nízkou molekulární hmotností	16
2.2. Ultrastruktura chemických složek dřeva	17
2.2.1. Makroskopická stavba dřeva	18
2.2.2. Mikroskopická stavba dřeva.....	19
3. Termická degradace dřeva	20
3.1. Obecná odolnost dřeva	20
3.2. Požární bezpečnost a požadavky na ochranu proti vzniku požáru	20
3.3. Vznícení dřeva	21
3.4. Fyzikální a chemické pochody probíhající při termické degradaci dřeva	22
3.5. Chování hlavních složek dřeva při teplotním namáhání.....	23
3.6. Chování doprovodných složek dřeva při teplotním namáhání.....	25
4. Dřevo při vystavení plnému požáru	26
4.1. Obecná požární odolnost a namáhání dřeva při požáru	26
4.2. Chování dřeva při plném požáru.....	27
4.3. Materiálové vlastnosti.....	28
4.4. Další vlivy, které ovlivňují chování dřeva při požáru	31
5. Rešerše zkušebních postupů pro určení odolnosti lepené spáry proti zvýšené teplotě	32
5.1. Standardizace.....	32
5.2. Zkoušení požární odolnosti na tělesech ve skutečné velikosti	33
5.3. Zkoušení požární odolnosti na tělesech malých rozměrů	34
5.4. Krípkové zkoušky při cyklických klimatických podmínkách	35
6. Cíle práce	38
7. Experimentální část	39
7.1. Metodický postup prací v experimentální části.....	39
7.2. Charakteristika zvoleného druhu dřeviny	40
7.3. Volba druhu dřevěného spoje.....	40
7.3.1. Standardní plátový spoj.....	40
7.3.2. Standardní plátový spoj s vloženou FRP tkaninou	41

7.4. Použité typy adheziv	42
7.4.1. Epoxidové lepidlo	42
7.4.2. Fenol-rezorcín formaldehydové lepidlo (PRF)	43
7.4.3. Polyuretanové lepidlo.....	44
7.4.4. EPI lepidlo.....	44
7.5. Lisování zkušebních těles	45
7.6. Zkušební metody	45
7.6.1. Teplotní expozice	45
7.6.2. Stanovení pevnosti v ohybu	47
7.6.3. Globální modul pružnosti v ohybu	47
7.6.4. Stanovení způsobu poškození spoje, kohezni porušení wood failure	48
8. Výsledky zkoušek	50
8.1. Charakteristika dřeva	50
8.2. Plátový spoj lepený epoxidovým lepidlem	50
8.3. Plátový spoj lepený fenol-rezorcín formaldehydovým lepidlem (PRF)	52
8.4. Plátový spoj lepený polyuretanovým lepidlem	53
8.5. Plátový spoj lepený EPI lepidlem	54
9. Shrnutí a diskuze výsledků	55
9.1. Vliv druhu lepidla na pevnost v ohybu plátového spoje při různých teplotních expozicích	55
9.2. Časová závislost pevnosti plátového spoje při teplotní zátěži 140 °C	55
9.3. Časová závislost pevnosti plátového spoje při teplotní zátěži 170 °C	57
9.4. Vliv druhu lepidla na modul pružnosti plátového spoje při teplotě 140 °C	58
9.5. Vliv druhu lepidla na modul pružnosti plátového spoje při teplotě 170 °C	59
9.6. Kohezni poškození plátového spoje (WF wood failure) při jeho vystavení teplotnímu namáhání 140°C.....	60
9.7. Kohezni poškození plátového spoje (WF wood failure) při jeho vystavení teplotnímu namáhání 170°C.....	61
9.8. Vliv vyztužení plátového spoje FRP tkaninou u epoxidového lepidla	62
10. Závěr	63
11. LITERATURA	65
12. Seznam zkratk	67
13. Přílohy	67
13.1. Tabulky dosažených a naměřených hodnot pro epoxidové lepidlo	67
13.2. Tabulky dosažených a naměřených hodnot pro fenol-rezorcín formaldehydové lepidlo	75

13.3.	<i>Tabulky dosažených a naměřených hodnot pro polyuretanové lepidlo</i>	79
13.4.	<i>Tabulky naměřených a dosažených hodnot pro EPI lepidlo.....</i>	83

1. Úvod

Jedním ze snadno přístupných materiálů, který lidé využívají po celou dobu svojí existence je dřevo. Řadíme ho mezi obnovitelné materiálové zdroje a nejen ve stavebnictví má svoji nezastupitelnou úlohu. K jeho nevýhodným vlastnostem patří zejména hořlavost. Chování dřeva jako hořlavého materiálu se dá v případě požáru relativně přesně vypočítat. Díky nízkému součiniteli tepelné vodivosti a schopnosti vytvoření zuhelnatělé vrstvy, která po určitou dobu brání dalšímu postupu požáru je tento postup v případě spalování dřevěné konstrukce poměrně pomalý. V důsledku tohoto zjištění prokázaly dřevěné konstrukce nejednou větší odolnost proti namáhání vysokým teplotám než konstrukce ocelové či železobetonové.

Dřevěné konstrukce jsou v současné době stále oblíbené a jejich rozvoj je v neustálém pohybu. K tomuto trendu i přispívají pozitivní vlastnosti lepených lamelových a kompozitních materiálů na bázi dřeva. Jejich odlišnost od tradičních tesařských postupů spočívá v moderní technologii výroby, kterou nynější procesy umožňují. Také se využívají lepené prostorové nosné soustavy, které jsou schopny díky svým výchozím parametrům překlenout velká rozpětí a mohou být vytvořeny i geometricky složité tvary. Tyto nové výrobní postupy aplikují prvky lepeného průřezu a prvky vyrobené z nových materiálů.

Pro samotný lepený spoj je jedním z nejdůležitějších aspektů správný výběr lepidla. Pevnost použitého adheziva v lepené spáře by měla vykazovat větší pevnosti než pevnost samotného lepeného dřeva. Samozřejmostí je odolnost lepidel vůči působení vzdušné vlhkosti, vody a zvýšeným teplotám. V dnešní době těmto požadavkům zejména vyhovují synteticky připravená fenol-formaldehydová, melamin-formaldehydová, rezorcín-formaldehydová, izokyanátová a polyuretanová lepidla. Před samotným lepením je podstatné, aby vlhkost dřevěného prvku (lamel, atd.) byla totožná s konečnou vlhkostí po zabudování v místě použití prvku.

2. Chemické složení dřeva

2.1. Přehled jednotlivých chemických složek dřeva

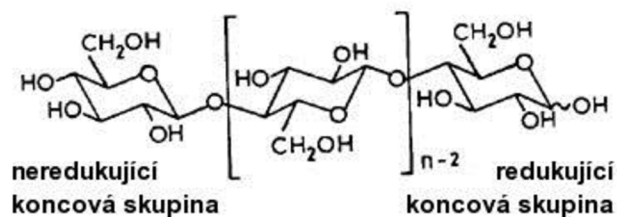
2.1.1. Makromolekulární látky

Suché dřevo, které je vysušeno do konstantní hmotnosti (při teplotě 105°C) má u různých druhů dřevin obdobné základní chemické složení a díky tomu i hustotu dřevní hmoty. V průměru obsahuje asi 50 % uhlíku, 44 kyslíku a okolo 6 % vodíku. U listů má větší zastoupení vodík (7-7,3 %), méně kyslík (40-41 %) a více dusík (do 2%). Kůra má totožně méně uhlíku a kyslíku a více vodíku a oproti samotnému dřevu obsahuje daleko větší množství minerálních látek. Z hlediska chemického složení dřeva je důležité rozlišovat mezi **hlavními částmi buněčné stěny**, ke kterým patří **celulóza, polyózy (hemicelulóza) a lignin** a **látkami s nízkou molekulární hmotností (např. minerální látky)**, které jsou spojeny s různými druhy dřevin a nacházejí se v něm v rozdílném množství. Obsah a podíl ligninu a polyóz se liší mezi měkkým a tvrdým dřevem, zatímco celulóza je součástí všech složek dřeva [1], [6].

U dřeva z mírných pásem zaujímají vysoko-polymerní sloučeniny, ze kterých se skládá buněčná stěna 97-99% dřevního materiálu. U dřeva z tropických pásem se tato hodnota pohybuje okolo 90%. Dřevo je převážně složeno z polysacharidů a jejich procentuální zastoupení se pohybuje v rozmezí 65-75% [1].

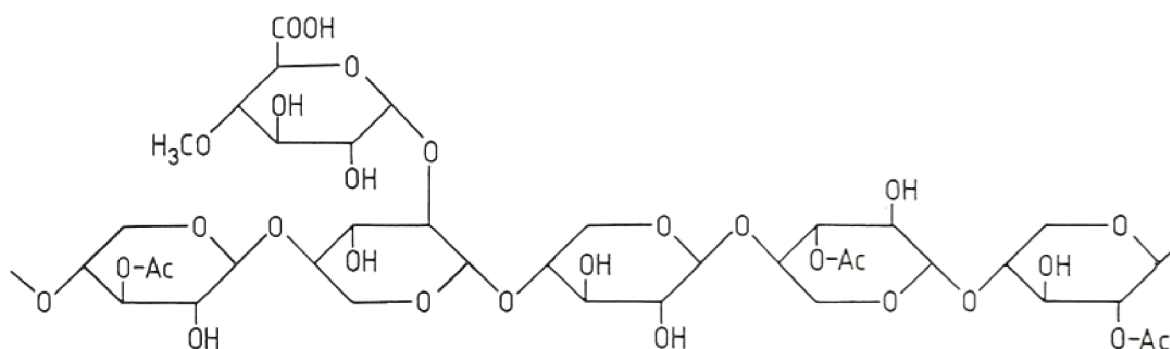
Celulóza je hlavní složkou dřeva a tvoří zhruba jednu polovinu dřevní hmoty u obou základních druhů dřevin. Lze ji stručně charakterizovat jako lineární vysoko-molekulární polymer složený výhradně z β -D-glukopyranózových lineárních jednotek spojených v polohách 1-4. Jednotky spolu sousedící jsou k sobě otočené o 180°C. Vzhledem k jeho chemickým a fyzikálním vlastnostem a supra- molekulární strukturou může plnit svou funkci jako hlavní stavební prvek u rostlinných buněčných stěn. Celulóza se skládá ze dvou částí a to z amorfni a krystalické. Makromolekula tohoto polymeru má délku bezmála 0,01 mm. Řetězce celulózy v krystalové mřížce po stranách navzájem drží sekundární vodíkové vazby. Ty způsobují rozdílné chování dřeva v různých směrech, kterému jinak říkáme anizotropie [1], [6].

Tento polymer má také přímou souvislost s pevností dřeva. Čím delší je polymerní řetězec celulózy, tím je vyšší polymerační stupeň a díky tomuto má dřevo i vyšší pevnost. Její řetězec může obsahovat 5-10 tisíc jednotek [1], [7]. Obr. č. 1 znázorňuje strukturní vzorec celulózy.



Obr. č. 1: Strukturní vzorec celulózy [4]

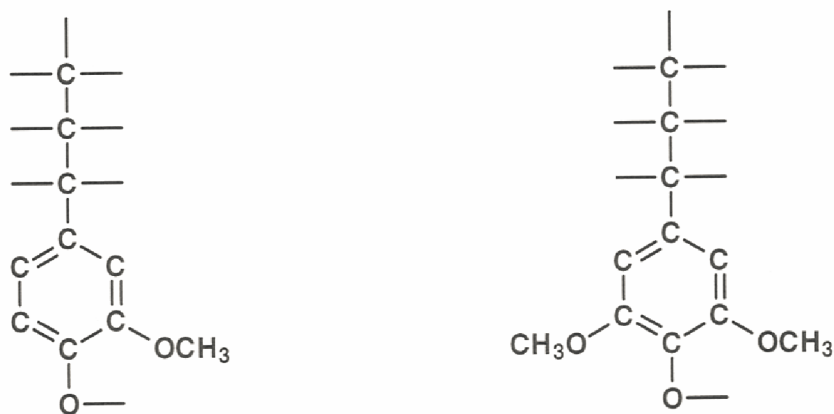
Polyózy (hemicelulózy) jsou v buněčné stěně v úzkém spojení s celulózou. Hlavními složkami těchto chemických sloučenin je pět neurálních cukrů a to hexa-glukóza, manóza, galaktóza, penta-xylóza a arabinóza. U některých z polyóz jsou obsaženy i uronové kyseliny. Molekulární řetězce jsou v tomto případě o několik řádů kratší než u celulózy, mají postranní skupiny, které jsou v některých částech rozvětvené. Tyto řetězce lze za pomoci hydrolyzy štěpit na jednodušší útvary některými zředěnými kyselinami či extrahovat zředěnými zásadami. Vyskytují se převážně v amorfni podobě. I přesto, že jejich postranní řetězce nevykazují větší délky, je řadíme k lineárním polysacharidům. Stejně jako lignin plní penetrační neboli vyplňující funkci v místě celulózové kostry buněčných stěn. Patří mezi látky doprovodné a je možné je oddělit některými vhodnými rozpouštědly. Díky jejich příznivé rozpustnosti můžeme říci, že jejich chemické vazby vůči elementárním fibrilám (micelám) nejsou tak pevné. Tyto složky dřevní hmoty ovlivňují chemické i fyzikální vlastnosti dřeva. Tento fakt nejvíce pozorujeme při základních zpracovatelských procesech úpravy dřeva, mezi které patří sušení, paření, vaření a lisování. Nejdůležitější hemicelulózovou složkou pro listnaté dřevo je xylan a pro jehličnaté se tato látka nazývá glukomanan. Dřevo jako takové obsahuje 20-35% hemicelulózových složek a jejich obsah má větší zastoupení u listnatých než jehličnatých dřevin. Z vědeckých analýz vyplývá, že větší část mananové frakce plní funkci kostry oproti výplni dřevní hmoty [1], [6]. Obr. č. 2 schematicky znázorňuje makromolekulu hemicelulózy.



Obr. č. 2: Schematické znázornění makromolekuly hemicelulózy [5]

Lignin je v pořadí třetí makromolekulární složkou dřevní hmoty. Obsah ve dřevě se pohybuje v rozmezí 20-30%. Jeho molekuly mají zcela odlišnou stavbu od polysacharidů, jelikož je definován jako aromatický systém, který se skládá z jednotek fenyln-propanu. Jedná se o třídimenzionální rozvětvený polymer, který zabezpečuje a umožňuje dřevnatění buněčných stěn. Lignin má větší zastoupení v jehličnatém oproti listnatému dřevu a i jeho stavba je u těchto dvou základních druhů dřevin rozdílná. Z morfologického hlediska je lignin amorfni látka nacházející se v místě sekundární stěny i střední lamely, kde má největší zastoupení (60-90%). Tento polymer je do buněčné stěny začleněn v jejím konečném stádiu, prostupuje navzájem fibrilami, a tak funguje jako jakási vyztužovací a spojovací jednotka [1], [6].

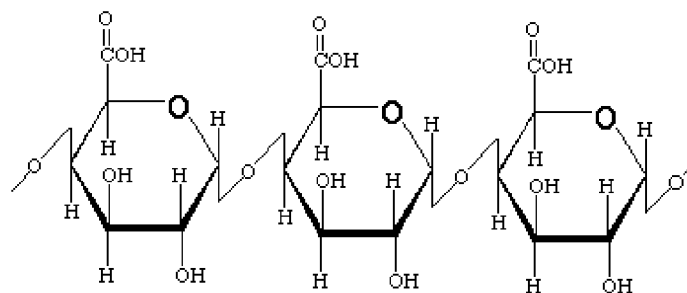
Lignin je látkou termoplastických vlastností s velkou schopností absorpce světla. Různé vědecké experimenty potvrdily spojitost s pevností mokrého dřeva, kdy po jeho odstranění ze struktury dřevní hmoty došlo k jejímu výraznému poklesu. Tímto byla potvrzena hydrofobní funkce tohoto polymeru. Dokáže tlumit nepříznivý vliv vlhkosti. Podílí se na pevnostech dřeva a inkrustuje (obaluje) polysacharidy, se kterými ho pojí částečná chemická vazba. Jeho samotná struktura není se svou složitostí ještě do této doby plně definována [1], [6]. Obr. č. 3 zobrazuje základní stavební jednotku ligninu jehličnatého a listnatého dřeva.



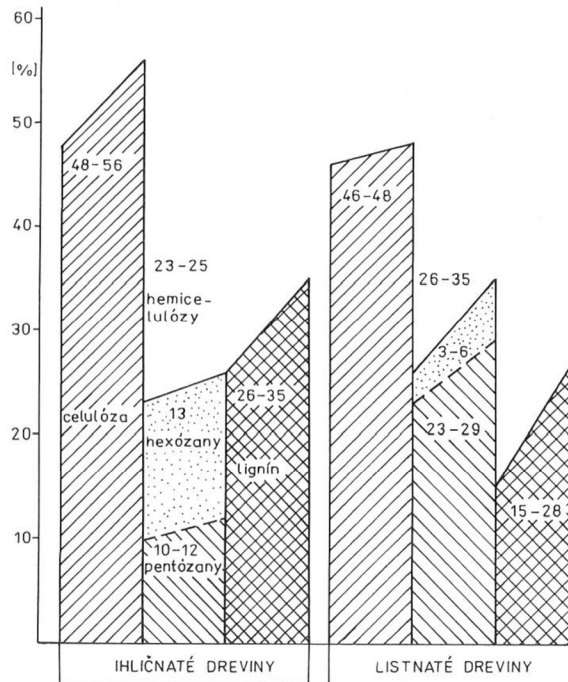
Obr. č. 3: Základní stavební jednotky ligninu jehličnatého a listnatého dřeva [5]

Sekundárně obsažené polymerní látky: Tyto sloučeniny se nacházejí ve dřevě v malém množství a patří mezi ně např. různé škroby a pektiny. Dělí se na látky organické a anorganické. Pektiny vytváří při buněčném dělení homogenní buňkové blány. Tento proces nazýváme diferenciací. K těmto látkám (pektinům) z chemického hlediska řadíme polysacharidy kyselého charakteru, které svým složením odpovídají kyselině D-galaktorunové. Vyskytují se ve větším množství u mladého dřeva. Proteiny představují nejvýše 1% z parenchymálních buněk dřeva, ale byly nalezeny i v nedřevěných částech dřívku, tj. kambiu a vnitřní kůře [1], [6].

Převážná část těchto látek má nízkomolekulární charakter a jsou rozpustné v různých rozpouštědlech. Díky tomuto je lze oddělit od základních složek dřeva. Kromě výše zmíněných látek může dřevo obsahovat ještě různé cyklitoly, aldehydy a alkaloidy [1], [6]. Obr. č. 4 zobrazuje příklad strukturního vzorce pektinu a obr. č. 5 znázorňuje vzájemný podíl základních stavebních látek v listnatém a jehličnatém dřevě.



Obr. č. 4: Příklad vzorce pektinu [7]



Obr. č. 5: Vzájemný podíl základních stavebních látek v listnatém a jehličnatém dřevě [5]

2.1.2. Látky s nízkou molekulární hmotností

Vedle složek, které obsahuje buněčná stěna, se ve dřevě nacházejí ještě další četné sloučeniny označované jako vedlejší či extraktivní (vyluhovatelné). Přestože se jedná o složky dřevní hmoty, jejichž procentuální obsah je k celkové hmotě zanedbatelný, mohou mít podstatný vliv na některé vlastnosti a v konečném důsledku i na zpracování samotného dřeva. Některé ze součástí, které obsahují kovové ionty, jsou dokonce nezbytné pro správné fungování stromu jako živého organismu [1].

Látky s nízkou molekulární hmotností vyskytující se ve dřevní hmotě řadíme do různých tříd chemických sloučenin, což vytváří složitý problém nalezení komplexního klasifikačního systému, do kterého bychom je mohli zařadit. Jedním ze způsobů rozdělení těchto složek je na látky organické a anorganické. Organické látky jsou běžně nazývány vyluhovatelnými. Složky označované jako anorganické se vyskytují ve formě popílku. S ohledem na různé vědecké analýzy je velice vhodné usuzovat a následně tyto látky rozlišovat na základě jejich rozpustnosti ve vodě a organických rozpouštědlech [1].

Aromatické (fenolické) sloučeniny

Mezi nejdůležitější látky patřící do této skupiny řadíme trísloviny, které mohou být hydrolyzovatelné a poté se zde vyskytují různé fenolické skupiny. Dalšími látkami, které

můžeme zařadit do skupiny fenolů, jsou např. stilbeny, lignany, flavonoidy a jejich deriváty. Do této skupiny chemických látek rovněž patří jednoduché sloučeniny, které jsou odvoditelné od struktury ligninu [1].

Terpeny

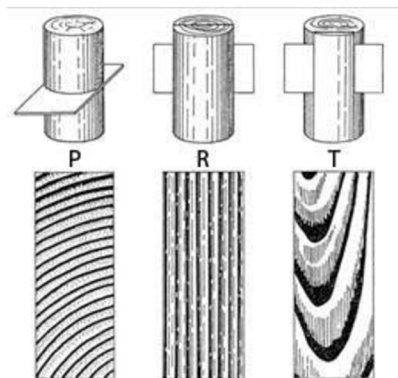
Tyto sloučeniny jsou převážně rostlinného původu a jsou rozšířené u celé řady přírodních látek. Po chemické stránce mohou být odvozeny od molekul isoprenu. Dle počtu izoprenových jednotek se dělí na monoterpeny, seskviterpeny, dipertyny, triperpeny, tetrapertyny a polyterpeny [1].

Karboxylové kyseliny

Patří sem nasycené a nenasycené vyšší mastné kyseliny, které se ve dřevě vyskytují především ve formě jejich esterů s glycerolem nebo vyššími alkoholy (vosky). Kyselina octová je spojena s polyózy jako esterová skupina. Di- a hydroxykarboxylové kyseliny se vyskytují převážně ve formě vápenatých solí [1].

2.2. Ultrastruktura chemických složek dřeva

Dřevo hodnotíme ve dvou rovinách pozorování a to na **makroskopické** a **mikroskopické** úrovni. Stavba dřeva je válcově-kuželovitá a rozlišujeme u ní tři základní řezy a směry (obr. č. 6).



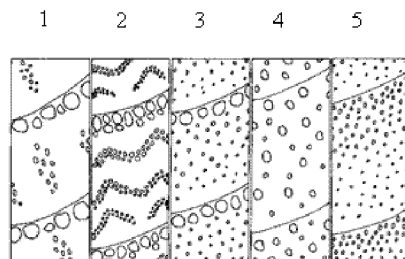
Obr. č. 6: Schématické znázornění základních řezů kmenem *P* – příčný (transversální) řez, *R* – radiální řez, *T* – tangenciální řez [9]

2.2.1. Makroskopická stavba dřeva

Z hlediska makroskopické stavby dřeva můžeme u základních řezů pozorovat strukturální části, které se však nemusí vyskytovat u každého jednotlivého druhu dřeviny. Jedná se zejména o letokruhy, cévy, dřevné paprsky, jádro, běl, vnitřní, vnější kůra, atd. Některé druhy dřevin mají na svém příčném řezu viditelné dřvo, které se liší barevnými odstíny. Tyto části jsou tři a nazývají se běl, jádro a vyztřalé dřvo. **Běl** se rozumí vnější světletší část kmene stromu a její šířka je odvislá od druhu dřeviny. Může obsahovat jen několik letokruhů nebo zabírat celý průřez kmene a pak je tato dřvina nazvána bělovou. Tato část kmene se od ostatních (jádro, vyztřalé dřvo) liší svými fyzikálními i mechanickými vlastnostmi. **Jádro** se nachází v centrální části kmene a jeho zbarvení je poněkud tmavšího charakteru. Svoji strukturou zabraňuje průchodu vody. To zapříčiňují látky nazvané jako jádrové, které jsou uloženy v buněčných stěnách a dutinách. U jehličnatých dřevin tyto látky představují pryskyřice a u listnatých gummy, alkaloidy či tzv. thyly. Poslední částí je **vyztřalé dřvo**. Svoji strukturou a stavbou se analogicky shoduje s jádrovou částí kmene, ale na rozdíl od běle ji nelze barevně odlišit. Průchodnost a propustnost pro kapalné látky se taktéž od bělové části neliší [11].

Dřeviny můžeme také rozlišovat podle struktury a vlastností jejich letokruhu. **Letokruh** je definován jako tloušťkový přírůstek dřeviny za jedno vegetační období, které se v našich zeměpisných šířkách omezuje hodnotou jednoho roku. Dělení dřevin podle charakteru jejich letokruhů je následující:

- jehličnaté,
- listnaté s kruhovitě pórovitou stavbou,
- listnaté s polokruhovitě pórovitou stavbou a
- listnaté s roztroušeně pórovitou stavbou.

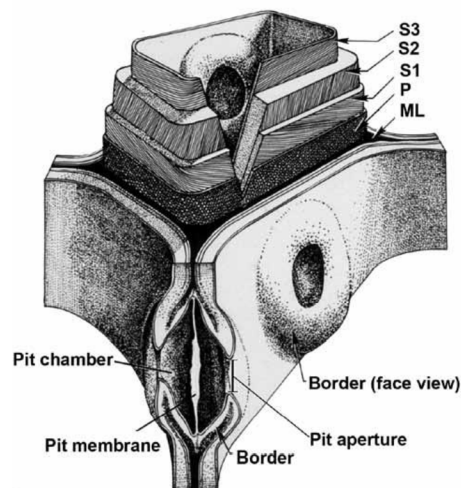


Obr. č. 7: Typy uložení cév na příčném řezu: 1, 2, 3 – kruhovitě pórovité dřeviny s různým uspořádáním letních cév, 4 – polokruhovitě pórovité dřeviny, 5 – roztroušeně pórovité dřeviny [6]

2.2.2. Mikroskopická stavba dřeva

U mikroskopické stavby dřeva můžeme pozorovat buněčnou strukturu dřevní hmoty, která je ve svojí podstatě klíčem k pochopení pochodů a funkce buněk ve dřevě. Živá rostlinná buňka se skládá ze dvou základních částí a to z protoplazmy a buněčné stěny. Protoplazma se na své nejjednodušší úrovni dělí na cytoplazmu (mimo jádro buňky) a nukleoplazmu (uvnitř jádra buňky). Je to součet živých součástí buňky, které jsou ohraničeny buněčnou membránou. Naopak buněčná stěna je neživá hmota tvořená sacharidovou maticí vsunutá do protoplazmy na vnější straně buněčné membrány. Stěna rostlinné buňky chrání protoplazmu před osmolýzou (proces zničení buňky destrukcí její buněčné membrány) a je schopna poskytnout mechanickou oporu rostlině jako celku [10].

Pro buňky nacházející se ve dřevě je situace o něco složitější, jelikož v mnoha případech konečnou funkci a strukturu buněk nese pouze sama buněčná stěna. Tento fakt způsobuje, že mnoho zralých buněk nemá nebo nevyžaduje svoje protoplazmy a dokonce je zapotřebí jejich protoplazmy odstranit, aby došlo k jejich plnému rozvoji a k dosažení funkční zralosti. V některých pramenech a literatuře o struktuře dřeva se proto uvádí buněčná stěna samostatně bez protoplazmy jako buňky, i když jde o výklad z biologického hlediska technicky nepřesný. Na následujícím obr. č. 8 je znázorněna v řezu stavba buněčné stěny dřevní hmoty [11].



Obr. č. 8: Řez buněčnou stěnou dřevní hmoty, kde je ML-střední lamela, P-primární stěna, Sekundární stěna ve 3 vrstvách-S1,S2 a S3 [10].

3. Termická degradace dřeva

3.1. Obecná odolnost dřeva

Odolnost dřeva značně ovlivňuje různorodost a proměnlivost jeho základních parametrů. Je závislá na tom, jakému prostředí je dřevo vystaveno, vlhkostní expozici, atd. V interiéru může být dřevo vystaveno biologické korozi (plísně, houby, hmyz) a požáru a u nechráněné expozice v exteriéru taktéž biologické korozi a požáru a navíc korozi vlivem působení atmosférických činitelů (sluneční záření, teplo, hygrotermální namáhání, vítr, déšť, prach a imise). Nelze ji přesně a spolehlivě ověřit bez vědecky podložených dat a komplexních záznamů z laboratorních měření jak v terénu, tak při definovaných podmínkách v in-situ. Dostupné informace a technické normy uvádějí či poskytují fundovaný návod, jak určit odolnost jádrového a bělového dřeva proti vybraným degradačním činitelům a organismům. Např. u dřevokazných hub je třída odolnosti obvykle určena u jádrového dřeva, které je z jedné poloviny vsazeno do zeminy a jeho druhá polovina je ponechána volně přirozenému prostředí. Z hlediska naší problematiky termického namáhání spoju se jedná zejména o teplotní napětí a přetvoření konstrukce v průřezech prvků a s tím související změna fyzikálně-mechanických vlastností dřeva [8], [10]. V tab. č. 1 je uvedena průměrná základní životnost běžně se vyskytujících dřevin v České republice:

Tab. č. 1: Průměrná životnost neošetřeného dřeva běžně se vyskytujícího v České Republice pro různé druhy prostředí [8]

	Ve styku s půdou	Odděleně od půdy		Ponořené do sladké vody
		Pod otevřenou střechou	V suchých a větraných místnostech	
	[roky]	[roky]		[roky]
1) Velmi trvanlivé dřeviny-dub, kaštan, akát, habr, modřín	8-12	100-200	500-1000	500
2) Středně trvanlivé dřeviny- borovice, smrk, jasan, jilm	8-10	90-120	500-1000	500
3) Málo trvanlivé dřeviny-buk, bříza, javor, lípa, topol, jedle, vejmutovka	2-5	2-75	100-500	<50

3.2. Požární bezpečnost a požadavky na ochranu proti vzniku požáru

Tato důležitá charakteristika nám podává informace o chování dřevěných produktů a výrobků při jejich podrobení teplotnímu namáhání. S její pomocí analyzujeme dřevěné stavby a snažíme se pokud možno o jejich nejlepší hodnocení z hlediska požární bezpečnosti a

odolnosti vůči zvýšeným teplotám a ohni. V neposlední řadě je pak věnována diskuze zpomalovačům hoření, které mohou být použity za účelem snížení hořlavosti dřeva [10].

Základním požadavkem požární ochrany je zabránění trvalému vznícení hořlavých materiálů nebo jiných hořlavých hmot. Zejména jde o správné navržení konstrukce, její montáž, trvalou údržbu budovy i jejího vnitřního zařízení dle povahy užívání a typu provozu. Mezi časté příčiny vzniku požáru a s tím spojeného ohrožení únosnosti budovy patří konstrukční nedostatky, které mohou být odpovědné i za rychlejší šíření tepla a ohně. Je proto nutné provést taková opatření, aby se těmto nežádoucím jevům v lepším případě zabránilo, či jejich vzniku v co největší míře předcházelo. Oheň je zapotřebí zlikvidovat v jeho počáteční fázi, kdy ještě není vyloženě ohrožena stabilita jednak konstrukčních spojů a prvků a posléze budovy jako celku. Tyto požadavky můžeme rozdělit do dvou širokých okruhů a to jednak požadavky na materiál a požadavky na budovy. Do kategorie materiálu spadají věci týkající se hořlavosti, schopnosti šíření plamene a požární odolnost. U budov tyto požadavky zahrnují např. výškové omezení užitných prostorů, dveřní otvory a další únikové východy, zóny se schopností uzavřít a izolovat požár, detektory požáru, atd. [10].

3.3. Vznícení dřeva

K tomuto jevu dochází tehdy, pokud je dřevo vystaveno dostatečnému teplu a nachází se v atmosféře s optimálním množstvím kyslíku. Rozlišujeme dva typy a to **řízené a neřízené**. První případ nastává v momentě, kdy se dřevo vyskytuje v přítomnosti zdroje hoření, jako je plamen či jiskra. Ve druhém případě se dřevo v přítomnosti zdroje nenachází a jeho povrch je zapálen např. tokem energie či tepelným tokem ohně nebo se vznítí za pomoci jiného vyhřívaného povrchu. Tento tok energie nebo tepelný tok se může skládat jak ze složky radiační, tak konvekční [10].

Základními ukazateli zapalování dřeva jsou vizuálně viditelné doutnání, žnutí či plamen podporované pyrolýzou dřevní hmoty. Tento stav nastává za příhodných podmínek, kterého je dosaženo vzájemnou kombinací či smíšením těkavých látek se vzduchem o správném složení v rozsahu teplot od 400 do 500°C. U některých z testů však byla teplota dřevěného povrchu daného vzorku před řízeným vznícením změřena v rozmezí 300 až 400°C. Tento fakt je ve shodě se třetím stádiem pyrolýzy, ve kterém je dokázáno, že dochází ke značné výrobě hořlavých těkavých látek. V některém z případů průběhu doutnání nebo žnutí může docházet k přednostnímu hoření s plamenem a to díky radiačnímu či konvekčnímu ohřevu dřeva, kdy má jeho povrch teplotu 200°C. Tento stav se shoduje s druhým stádiem pyrolýzy dřevní

hmoty. Důležitým mechanismem, který zapříčiňuje vznícení dřeva je právě zapalování spojené s doutnáním [10]. V tab. č. 2 jsou uvedeny teploty pro vybrané druhy dřevin, při kterých dochází k jejich samovznícení, vznícení, hoření a žhnutí:

Tab. č. 2: Vybrané teploty charakteristických dějů probíhajících ve dřevě pro některé z běžně se vyskytujících typů dřevin [12].

	Smrk	Borovice	Dub
Teplota samovznícení	120 °C	80 °C	120 °C
Teplota hoření	241 °C	230 °C	238 °C
Teplota žhnutí	305 °C	295 °C	298 °C
Teplota vznícení	397 °C	306 °C	375 °C

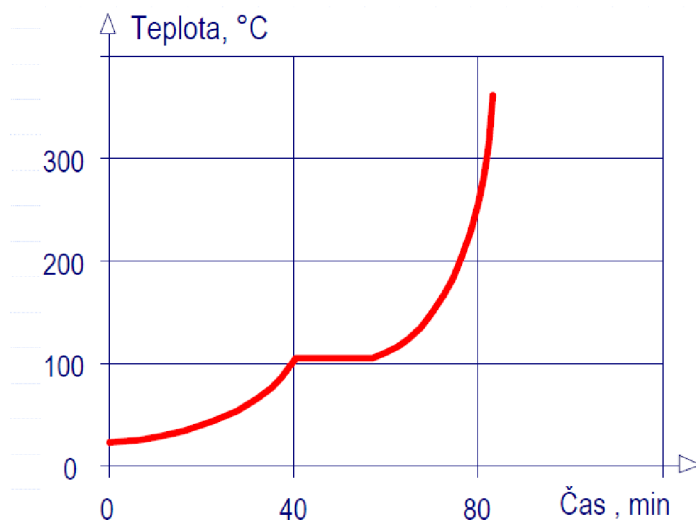
3.4. Fyzikální a chemické pochody probíhající při termické degradaci dřeva

Během hoření dřeva a materiálů na bázi dřeva dochází k chemickému rozkladu, při kterém se tvoří uhlí a hořlavé plyny. Tenký proužek dřeva potřebuje k samovznícení teplotu od 340 do 430 °C. Zápalná teplota ale dosahuje nižších hodnot např. okolo 150 °C za předpokladu delšího ohřevu dřevěného prvku. Teploty do 100 °C přispívají k ohřevu dřeva a také k jeho rychlejšímu vysušení. Při těchto teplotách začíná také docházet ke snižování pevností a modulů pružnosti [28].

Při dosažení 100 °C dochází k počátku odpařování vody a vzniklá pára se snaží ze dřeva cestou nejmenšího odporu unikat (např. rohy, hrany, spoje, otevřené póry a trhliny). Dřevo logicky vysychá v těchto místech rychleji oproti jeho zbývající části. Tato teplota je na konstantní úrovni po dobu odpaření veškeré vody. Na obr. č. 9 je znázorněna teplota pod vrstvou pyrolýzy v závislosti na čase, po který je dřevo namáháno požárem dle křivky teplota-čas ISO 834. Z této křivky je patrné, že teplota narůstá po odpaření vody při 100 °C. Pyrolýza je zóna nacházející se mezi vrstvou dřevěného uhlí a nepoškozeného dřeva. Dřevěný materiál je již chemicky ohněm pozměněn, ale není ještě zcela v rozkladu [28].

V rozhraní mezi 150 až 200 °C dochází ke vzniku plynů, které obsahují ze 70 % nehořlavý oxid uhličitý (CO₂) a z 30 % hořlavý oxid uhelnatý (CO). Od teploty 200 °C se tvoří ve stále větší míře hořlavé plyny a podíl nehořlavého CO₂ klesá. V momentě vznícení těchto plynů povrchová teplota značně narůstá a ve vrstvě pyrolýzy o tl. cca. 5 mm nastává zuhelnatění

dřeva. Nad teplotní hranicí 500°C se plyny tvoří již výrazně méně a je přítomen větší obsah dřevěného uhlí.



Obr. č. 9: Teplota pod vrstvou pyrolýzy u dřeva, které je vystaveno požáru podle normové teplotní křivky ISO 834 [29]

V následující tab. č. 3 je uveden přehled jednotlivých chemických dějů v závislosti na vzrůstající teplotě.

Tab. č. 3: Přehled chemických procesů ve dřevě při různých teplotních expozicích [15].

Teplota [°C]	Probíhající chemický proces
95 - 200	Transport vodní páry a možné odhořívání dřeva.
200 - 280	Dochází k úniku vodní páry, kyseliny mravenčí, kyseliny octové atd. Určitá možnost nesnadného zapálení dřeva.
280 - 500	Zasažené vrstvy průřezu černají. Vznik rozvinutého požáru. Zvyšující se teplota způsobuje zvětšování hořících vrstev dřeva.
500 a výše	Postupná přeměna dřeva na uhlí, jeho žhnutí a tvorba popelu.

3.5. Chování hlavních složek dřeva při teplotním namáhání

Termicky nestabilní celulóza a hemicelulózy podléhají při zvyšující se teplotě pyrolytickým a oxidačním reakcím, které mají za následek tvorbu hořlavých plynů. Zato termicky stabilnější lignin přispívá více k tvorbě uhlí. Tato vlastnost umožňuje redukovat tvorbu dalších plynů a pomáhá tak k ochraně dřeva v průběhu tepelného namáhání před jeho další degradací.

Pevnostní charakteristiky dřeva pak nejvíce ovlivňuje především pokles molekulové hmotnosti celulózy během její pyrolýzy [2].

Při zahřívání suchého ligninu se tvoří tvrdší živice a naopak vlhký lignin vytváří při zahřátí živici plastičtější (měkčí). Lignin jak již bylo uvedeno výše, je vůči teplu z větší části odolný (rezistentní). K jeho mírné degradaci dochází již při nižších teplotách, kdy se začínají vytvářet polysacharidy, ale v pozdějším stádiu zuhelnatí na produkt, který se obtížně zapaluje. Z tohoto zjištění vyplývá, že to, co způsobuje hořlavost dřeva jako takového, jsou jeho polysacharidické složky [2].

Termolytické reakce u hlavních složek dřeva můžeme podle prof. Shafízádeha rozdělit do následujících skupin s limitní teplotou do 300°C na

- dehydrataci,
- štěpení vazeb v makromolekulách polysacharidů, díky kterému klesá jejich polymerační stupeň, vzniká kyselina octová z odštěpených acetylenových skupin hemicelulóz,
- štěpení C-C alkyl-alkylových vazeb a C-O-C₄ alkyl- arylových éterových vazeb u ligninu,
- štěpení fenyglykosidových vazeb mezi hemicelulózami a ligninem,
- vznik volných radikálů a reaktivního zbytku uhlíku,
- vytvoření oxidů uhlíku (uhličitého a uhelnatého) a karbonylových, karboxylových a hydroxyperoxidových funkčních skupin.

Při teplotě, která dosáhne více jak 300°C dochází k těmto pochodům:

- depolymerizace celulózy a s tím ke vzniku různorodých monomerních produktů,
- štěpení vazeb C-C, C-O-C a dalších a k následnému vzniku nízkomolekulárních prchavých látek (H₂O, oxid uhličitý a uhelnatý, CH₃OH, CH₂OH, atd.) a
- opětovná polymerace rozkladných meziproduktů celulózy a ligninu, kde poté dochází k vytvoření dehtových látek, které obsahují vysoký podíl uhlíku.

Trojrozměrná benzenoidní struktura ligninu je schopna dobře odolávat nežádoucímu tepelnému zatížení. Při pozvolném zahřívání za podmínek atmosférického tlaku se vytvoří prostředí pro vznik kondenzačních reakcí. Ty mají za následek vznik prchavých produktů spalování a ve větším množství dochází ke tvorbě uhlí. Při termolýze ligninu se tvoří monomerní produkty (fenoly), které se vůči svojí základní stavební jednotce ligninu C₉

určitým způsobem chovají. Tyto produkty termolýzy ligninu se mohou zpětně metylovat a jejich řetězec alifatické povahy má schopnost se v různém poměru štěpit a tudíž obsahuje tři, dva a jeden atom uhlíku. Působením tepla se tvoří radikály, které nabývají různé struktury a stability. V závislosti na reakčních podmínkách, kterými jsou teplota a rychlost ohřevu se nové radikálové struktury a tvary stabilizují do dalších fragmentací nebo se dále podílejí na probíhajících kondenzačních reakcích. Samotný pochod termolýzy ligninu je velice komplikovaný děj, u kterého se vzájemně kombinují různé kondenzační a degradační procesy. U rozmezí teplot od 100°C do 180°C dochází při zahřívání ligninu k jeho plastifikaci (endotermická reakce). Pochody, které se dějí v dalším průběhu zvyšování teploty, mají různorodou chemickou povahu a většinou se jedná o reakce exotermického charakteru [2].

Během ohřevu dřeva dochází i ke vzniku teplotního gradientu. O tepelných vlastnostech dřeva nejlépe vypovídá jejich specifická tepelná kapacita a koeficient tepelné vodivosti. Se zvyšující se teplotou dřevo ztrácí i na hmotnosti, jelikož se jako první vypaří voda a začínají se tvořit prchavé produkty termickou degradací složek dřevní hmoty. Zvýšená teplota má logicky vliv i na změnu barvy dřeva. K výraznější barevné změně na světle hnědou dochází při teplotě okolo 220°C. Tenká zuhelnatěná vrstva se začíná tvořit při teplotě okolo 270°C. Záleží na geometrii, rozměrech zkušebních těles, způsobu tepelného namáhání a dalších důležitých faktorech [2].

3.6. Chování doprovodných složek dřeva při teplotním namáhání

Je-li dřevní hmota vystavena delší dobu teplotám nad 100°C, dochází i k postupné termické degradaci doprovodných složek dřeva. Změny v jejich chemické struktuře mohou mít za následek složitější postup povrchových úprav, jelikož tyto nízkomolekulární látky (mastné kyseliny, tuky, vosky, atd.) migrují k povrchu dřevního elementu a nepříznivě ovlivňují barvu dřeva a zejména adhezi nátěrových látek [2].

U jehličnatých dřevin jsou živice v parenchymatických buňkách tvořeny zejména z glyceridů mastných kyselin (tuky) a esterů mastných kyselin s vyššími polycyklickými alkoholy (vosky). V jehličnatém dřevě patří k nejvíce vyskytujícím se mastným kyselinám kyselina olejová a linolová. Tyto kyseliny se ve dřevní hmotě nacházejí převážně jako triglyceridy. Vosky jsou tvořeny zejména steryl estery kyseliny linolové [1].

Triglyceridy, které se nacházejí v jehličnatém dřevě, mají teplotu tavení v rozmezí od -13°C do +70°C a u vosků se tato teplota pohybuje od +42°C až do +90°C. Tento poznatek vede k tomu, že zmíněné tuky a vosky mohou migrovat na povrch dřevní hmoty již při teplotách,

kteřé nedosahují 100°C. Při experimentálním vyhodnocení vzorků dřeva, které bylo vysušeno při teplotě 70°C byly detekovány estery mastných kyselin v bělovém dřevě a to v jeho okrajové části. Jeho množství narůstalo při zvyšování teploty až po rozmezí od 100 do 160°C. Vyšší teploty mohou mít za následek termickou degradaci tuků a vosků za vzniku odpařitelných sloučenin. Přispívá k tomu i ten fakt, že při těchto teplotách dochází k plastifikaci ligninu, která jejich uvolňování napomáhá [23].

Na příčném řezu jádrového jehličnatého dřeva můžeme za pomoci světelného mikroskopu detekovat tenké živičné skvrny. Vyskytují se zejména na hranici mezi letním a jarním dřevem a v samotném letním dřevě. Z infračervených spekter pak můžeme dojít ke zjištění, že pro některé části jádrového dřeva, které obsahují právě živičné skvrny je charakteristická absorpance (pohlčení světla daným vzorkem) karbonylových skupin [24].

Při dalším zvyšování teploty na 120 až 180°C dochází ke snížení obsahu živičných skvrn v jádrovém dřevě, jelikož část těchto živičných kyselin se přes radiální živičné kanálky postupně z dřevní hmoty dostává ven. Je také možné zároveň s tímto pochodem sledovat přítomnost živičných kyselin v bělovém dřevě i v jeho okrajových částech. Když teplotní namáhání dosáhne hranice 200°C, tak již živičné kyseliny v celém svém objemu z jádrového a bělového dřeva odchází a namísto nich vznikají tmavé skvrny [23].

4. Dřevo při vystavení plnému požáru

4.1. Obecná požární odolnost a namáhání dřeva při požáru

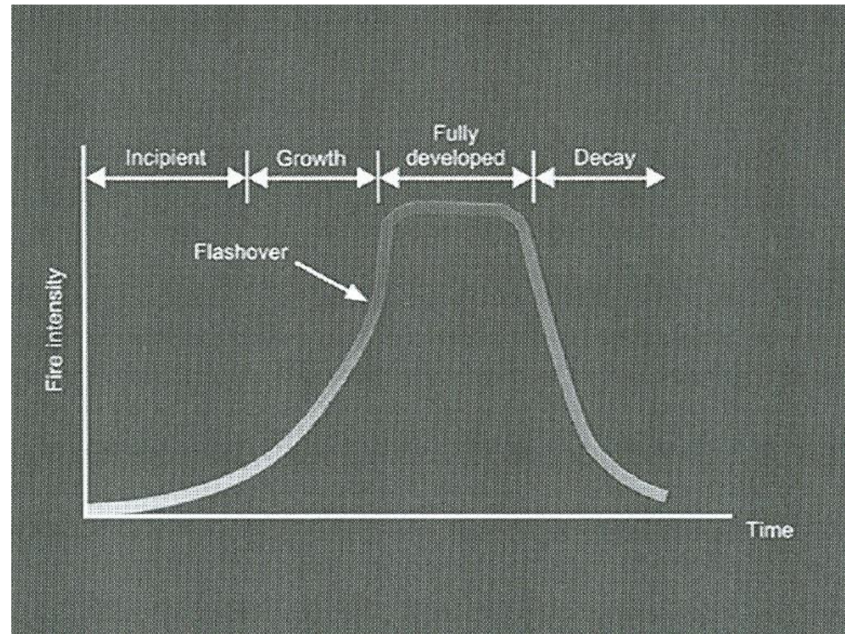
Z hlediska obecné požární odolnosti bychom měli znát hodnoty požární odolnosti dvou kategorií prvků, kterými jsou stavební výrobky a stavební konstrukce. Je třeba navrhovat a realizovat takové konstrukce a výrobky, které námi požadované hodnoty splní a vyhoví jim.

Chování dřeva (jako konstrukčního materiálu) při požáru nelze popsat jednoduchým způsobem. Rozlišujeme dvě fáze požáru, a to vznikající požár a plně rozvinutý neboli plný požár (viz obr. č. 10). Chování materiálů na bázi dřeva musí být hodnoceno z obou hledisek těchto fází [28].

Vznikající požár zahrnuje různé druhy procesů, mezi které řadíme např. hořlavost materiálu, stupeň zápalnosti, rychlost šíření plamene v povrchových částech a míru předávání tepla [28].

Plný požár nastává po fázi vzplanutí (*flash over*), u které dochází k zachvácení všech hořlavých materiálů ohněm. Požadovanými vlastnostmi materiálu během této fáze jsou

zachování nosnosti a schopnost omezovat oheň v oblasti jeho vzniku, čili nedojde k jeho rozšíření a s tím spojeného působení vysokých teplot na straně odvrácené ohni. Ty by mohly způsobit nepřímý přenos požáru na sousední oblasti [28].

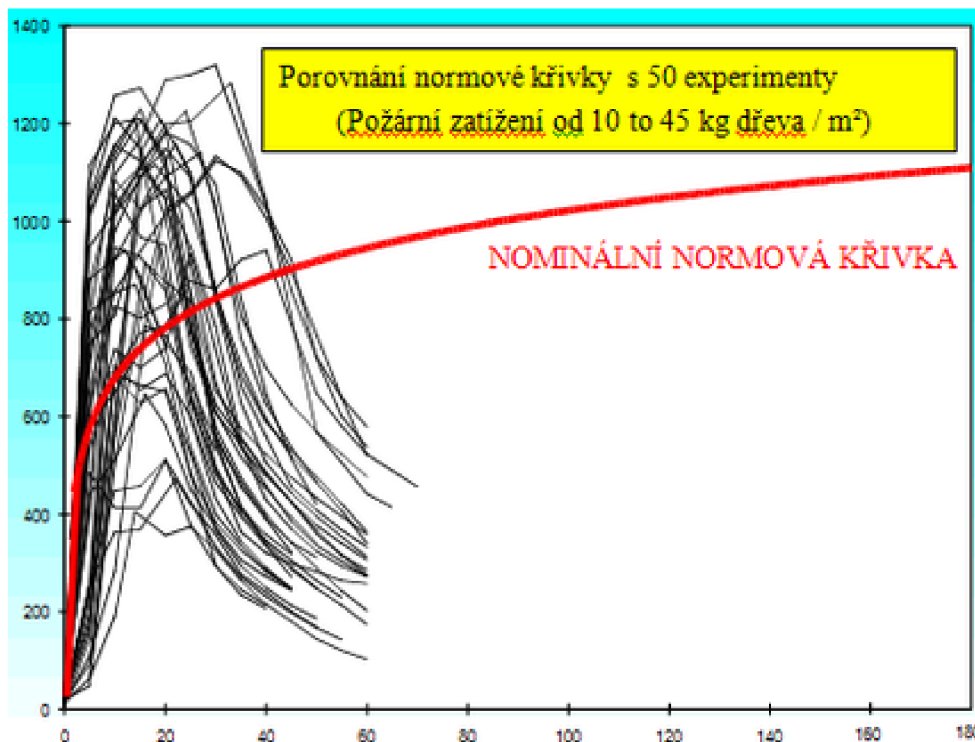


Obr. č. 10: Jednotlivé fáze požáru [9]

4.2. Chování dřeva při plném požáru

Při situaci, kdy dojde k požáru, je daná konstrukce vystavena teplotnímu a mechanickému namáhání, které se svými specifickými vlastnostmi odlišuje od zatížení běžnými teplotami. Tepelné zatížení můžeme spolehlivě a zjednodušeným způsobem modelovat nominální normovou teplotní křivkou. Nominální normová teplotní křivka, definovaná v EN 1991-1-2, je základním z možných přístupů při výpočtu požární spolehlivosti konstrukcí. Z obr. č. 11 je zřejmé, že existují nepřesnosti při ověřování chování konstrukcí vystavených skutečnému požáru, než je uvažováno postupem dle nominální normové teplotní křivky. Některé faktory ovlivňující chování skutečného požáru nominální normová křivka neuvažuje [28].

Zdrojem spolehlivosti a odolnosti konstrukcí při požáru mimo výpočtu mezního stavu únosnosti při namáhání za běžných teplot je také standardní požární ochrana. Mechanické zatížení při požáru je také oproti zmiňované vypočtené hodnotě mezního stavu únosnosti při namáhání za běžných teplot nižší [13].



Obr. č. 11: Teplotní křivky pro přirozený a normový požár [25]

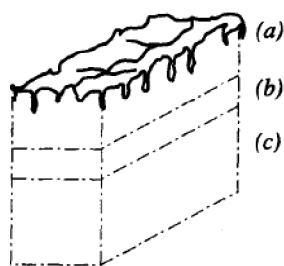
4.3. Materiálové vlastnosti

Chování materiálů na bázi dřeva a rostlého dřeva nám ukazuje, že tyto materiály jsou ve své podstatě hořlavé a je nezbytné je tímto způsobem zařazovat. Nelze žádným způsobem dosáhnout nehořlavosti těchto materiálů, i když existují způsoby (např. impregnace ohnivzdornými solemi), které umožňují zvýšení potřebné energie k jejich zapálení. Pokud jde o zápalnost samotného rostlého dřeva je prokázáno, že k jeho zapálení dochází obtížněji než u jiných materiálů. K samovznícení rostlého dřeva (tj. není přítomen zdroj zapálení) je zapotřebí dosáhnout povrchové teploty více než 400°C, která na materiál působí v krátkém či středně dlouhém časovém horizontu. I když je přítomen zdroj zapálení, tak musí být teplota povrchu dřevěného materiálu po určitou dobu vyšší než 300°C, aby mohlo dojít k jeho zapálení. Nejlépe vypovídajícími ukazateli o příčině zapálení dřeva jsou objemová hmotnost, druh dřeva, obsah vlhkosti a obvod průřezu [28].

Příčina šíření ohně na povrchu dřeva spočívá v tom, že každé nové zapálení způsobuje v jeho okolí zapálení nová. Z důvodu obtížné zápalnosti dřeva máme rychlost, kterou se šíří plamen na přijatelně nízké úrovni. V případech s nízkým požárním rizikem je dovoleno používat rostlé neošetřené dřevo. Závislost rychlosti, kterou dřevo předává teplo, pravděpodobně spočívá na druhu a způsobu ohřevu. Dále pak na množství kyslíku, který má k materiálu přístup, objemové hmotnosti a velikosti daného dřevěného prvku. Většina evropských zemí si

vyvinula vlastní zkoušky v modelovém měřítku pro určení základního chování materiálu, a tudíž nejsou k dispozici jednotné evropské postupy, které by přiblížily chování dřeva v podmínkách při vznikajícím požáru [28].

Pokud je dřevo či materiál na této bázi vystaven plnému požáru, můžeme pozorovat celou řadu pozitivních vlastností. Dostatečně silný tepelný tok způsobí, že nejprve dojde k zapálení povrchu, který začne silně hořet, ale za poměrně krátkou dobu se vytvoří tepelně izolační vrstva dřevěného uhlí, jak naznačuje následující obr. č. 12.

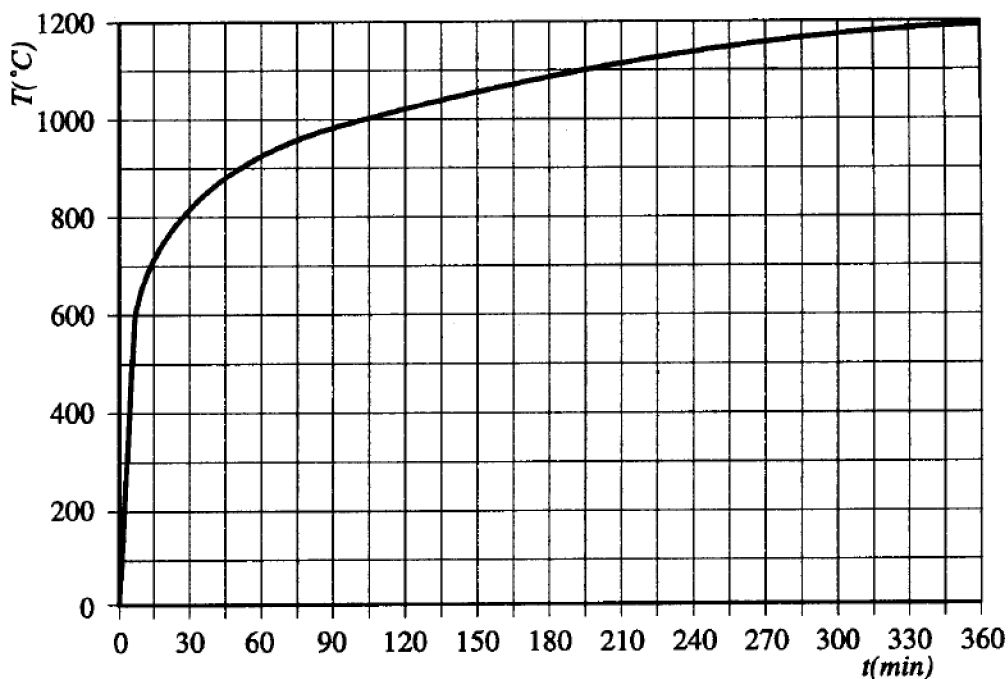


Obr. č. 12: Změny dřeva při působení požáru (a) vrstva dřevěného uhlí, (b) vrstva pyrolýzy, (c) nepoškozené dřevo [9]

U rostlého dřeva je teplota ve zbytkovém průřezu již malé vzdálenosti od zóny hoření prakticky beze změny. Díky tomu v konstrukci nedochází k poruchám z důvodu nadměrných tepelných dilatací. Také nedochází ke změnám fyzikálních vlastností dřevěného materiálu v jeho zbytkovém průřezu vlivem ohřevu a pokles pevnosti souvisí zejména s redukcí průřezu z důvodu jeho zuhelnatění a částečně se změnou pevnostních vlastností [28].

Pro plný požár se při předepsaných zkouškách používá normová teplotní křivka dle ISO 834, která je znázorněna na obr. č. 13, nebo dle uvažovaných národních normativních předpisů [28]. Základními kritérii jsou zachování

- nosnosti,
- požárně dělící funkce a
- tepelně izolační funkce.



Obr. č. 13: Normová teplotní křivka teplota-čas dle ISO 834 [9]

První kritérium (nosnosti) obsahuje kritický průhyb a rychlost zvětšování průhybu. Požárně dělicí funkci definuje obecně zejména vznik nadměrných trhlin a spár (národní ustanovení) či na základě zapálení vnitřní výplně z bavlněných vláken. Pro tepelně izolační účinek platí, že dojde-li k průměrnému teplotnímu nárůstu o 140K nebo je překročen maximální vzestup o 180K, bereme ho jako ohrožený [28].

Dřevo svoji únosnost ztrácí za okolností, kdy jeho průřezová plocha zbytkového průřezu, která ještě není porušena vlivem ohně, je tak malá, že vzniklá napětí účinkem působícího zatížení dosáhnou pevnosti dřeva [28].

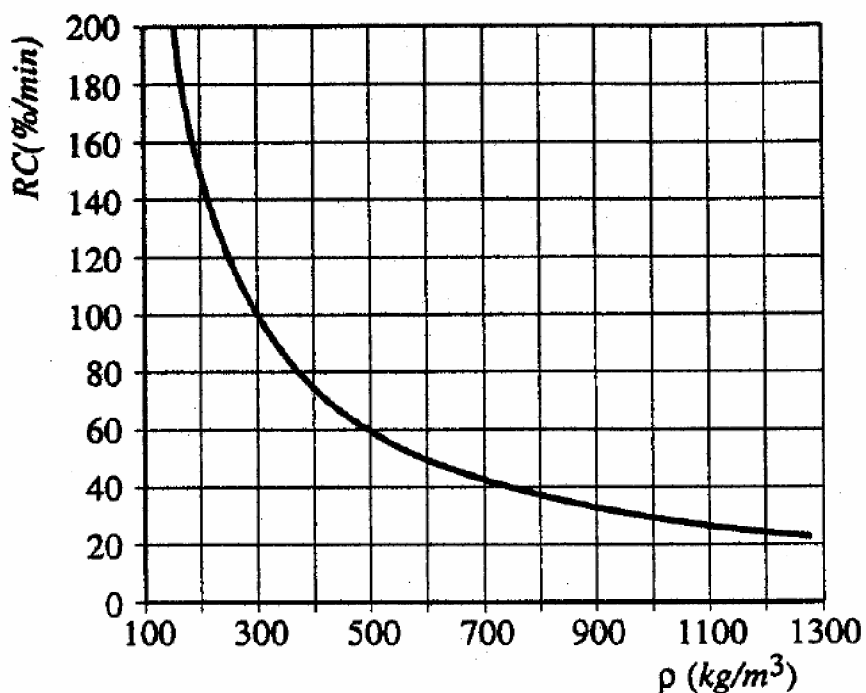
Materiály na bázi dřeva při probíhajícím požáru nepraskají a nesesychají tak výrazným způsobem, že by se tvořily trhliny, ale nejprve dojde ke vzniku tenké vrstvy dřeva, které pak následně prohořívá. Narůstající teplota překročí svoji mezní hodnotu v tom případě, když tenkovrstvá požáru vystavená zóna dosáhne protilehlý povrch těsně před prohořením. Při podmínkách plného požáru jde velmi spolehlivým způsobem chování dřeva předpovídat [28].

4.4. Další vlivy, které ovlivňují chování dřeva při požáru

Chování dřeva a materiálů na bázi dřeva při plném požáru je značně ovlivněno jeho tvarem, povrchem, obvodem a rozměry průřezu [28].

Hořlavost je ve vzájemné spojitosti s poměrem povrch/objem. Pokud tento poměr narůstá, šíření plamene je rychlejší. Tento poměr se zvětšuje s množstvím ostrých hran a zdrsněním povrchu a v konečném důsledku tyto faktory napomáhají k nestandardnímu chování v průběhu požáru. Ke zvýšení rizika napadení ohněm přispívají i vyskytující se praskliny a trhliny. Lepené lamelové dřevo, které má menší procento trhlín, vykazuje tedy menší zuhelnatění oproti rostlému dřevu [28].

Doba, která je potřebná k zapálení dřeva a šíření plamene také závisí na objemové hmotnosti (v suchém stavu), čili rozdílné druhy dřeva se během požáru nechovají totožně [28]. Tento vztah je znázorněn na následujícím obr. č. 14.



Obr. č. 14: Vzájemný vztah mezi objemovou hmotností a rychlostí zuhelnatění RC (Blass, 1995) [9]

Vzájemná souvislost mezi objemovou hmotností a zapálením je připodobněna předcházejícímu vztahu mezi objemovou hmotností a rychlostí zuhelnatění, kde vyplývá, že čím je objemová hmotnost vyšší, tím je potřebný čas k zapálení dřeva delší [28].

Mezi dalšími již zmiňovanými parametry ovlivňujícími chování dřeva při požáru figuruje jeho vlhkost. Ta se v dřevěných konstrukcích pohybuje v rozmezí od 8 do 15%. To má za

následek to, že z každé 1 t dřeva musí odejít 80 až 150 kg vody, aby mohlo začít hořet. Tento vliv vlhkosti v důsledku malého rozsahu rovnovážné vlhkosti mezi 8 a 15 % je možné zanedbat [28].

5. Rešerše zkušebních postupů pro určení odolnosti lepené spáry proti zvýšené teplotě

5.1. Standardizace

Požadavky na chování lepidel, která jsou určena k lepení nosných dřevěných konstrukcí, podléhají v Evropě těmto následujícím normativním předpisům:

- lepidla na bázi fenolu a aminoplastů prEN 301
- jednosložková polyuretanová lepidla EN 15425
- polyizokyanátová lepidla prEN 16254

Z důvodu odlišného chování fenolických oproti jednosložkovým polyuretanovým a polyizokyanátovým lepidlům (fenolická vykazují vyšší odolnost proti zvýšeným teplotám než jednosložková polyuretanová a polyizokyanátová lepidla), kde tento rozdíl je způsoben jejich rozdílným chemickým složením, byly výše uvedené normy zpracovány a přizpůsobeny jednotlivým typům adheziv [3].

Pomocí výše uvedených normativních předpisů byl odzkoušen vliv extrémních vlhkostních podmínek na **mechanickou odolnost a trvanlivost lepidel**.

Zkoušení odolnosti lepidel proti zvýšeným teplotám (teplota okolo 90°C) probíhalo za pomoci dvoutýdenních zátěžových testů při stálém zatížení vzorků dle EN 15416-2. Tato zkušební metoda zahrnuje situace při vystavení lepených dřevěných prvků dlouhodobému působení vysokých teplot (např. dopadající sluneční záření) a byla sestavena ve spolupráci s americkou normou ASTM D 3535 [3].

Tečení při zatížení (kríp) konstrukčních lepidel bylo testováno v cyklických klimatických podmínkách při maximální teplotě 45°C za použití namáhání v ohybu a smykového napětí a tyto zkoušky jsou definovány v EN 15416-3 [3].

Současné evropské normy však neposkytují žádné další informace pro posouzení odolnosti lepidel při zvýšené teplotě či v případě požáru.

Nosné dřevěné prvky mohou být testovány **při zkouškách požární odolnosti zkušebních těles ve skutečné velikosti** dle evropských norem prEN 1365-2 **či podrobeny analýze a navrženy v souladu s požární odolností dle Eurokódu 5 (EN 1995-1-2)**. Pokud jde o odolnost lepidel tak norma uvádí, že u některých adheziv je teplota měknutí (přechod do skelné fáze) podstatně nižší než teplota, při které dochází k uhelnatění dřeva [3].

Jiné evropské normy při testování odolnosti lepidel uvažovaly teploty vyšší než pokojové. Například EN 14292 stanovuje dobu poškození při konstantní rychlosti namáhání teplotou 50 °C/hod a konstantním zatížením vzorků (slepenců) totožných dle EN 302-1. Další z evropských norem EN 14257 také známá pod názvem test Watt 91 hodnotí pevnost vazby lepidel při teplotě okolo 80 °C [3].

V roce 2009 byla vytvořena v Evropě pracovní skupina pod názvem **CEN TC 193/SC1/WG13**, která se zabývala problematikou odolnosti lepidel při zvýšených teplotách a v případě požáru. **Na rozdíl od americké normy ASTM D 7247** zabývající se vývojem vhodné zkušební metody testování lepidel používaných u konstrukčních prvků vystavených ohni by tato norma měla zahrnovat požární **zkoušky na vzorcích ve skutečné velikosti**. Je třeba zjistit, zda existuje **přímá spojitost mezi odolností lepidel testovaných při zvýšených teplotách u vzorků malých rozměrů a ve skutečné velikosti, pokud je to možné**. Výše uvedená metoda ASTM D 7247 testuje adheziva při teplotách **vyšších jak 220 °C**, a tudíž jsou z tohoto testování vyloučeny zejména nové typy lepidel, které vykazují dostatečnou pevnost při reálných požárních zkouškách. Z tohoto důvodu nemusí být tato norma vhodná pro posuzování a testování vzorků malých rozměrů [3].

5.2. Zkoušení požární odolnosti na tělesech ve skutečné velikosti

Jelikož posuzování konstrukcí podle Eurokódu 5 dává obecně konzervativní výsledky, je vhodné v případě potřeby zjištění vyšší požární odolnosti provést zkoušky ve zkušební laboratoři. Zkoušky se provádí na zkušebních tělesech skutečných konstrukčních rozměrů pod zatížením pro mimořádnou návrhovou situaci, které je většinou rovno 60% zatížení při běžné teplotě [3].

Stavební zákony zabývající se zkouškami požární odolnosti jsou v různých zemích jako je **Kanada nebo Spojené státy americké** odlišné a požadují, aby zkoušky požární odolnosti byly prováděny právě **na vzorcích ve skutečné velikosti pro** danou konstrukční aplikaci.

Testování vzorků ve skutečné velikosti **v Japonsku** probíhá na základě japonské směrnice NTI. Za tímto účelem se používají dva lepené lamelové dřevěné nosníky s určitými rozměry a

výškou lamely. Ty jsou pak testovány standardním postupem stanoveným normou ISO, která uvádí požární křivky dle ISO 834 (nominální normová teplotní křivka uvedená viz výše). Teplotní namáhání se aplikuje ze třech stran a je uvažováno 4 bodové zatížení. Namáhání ohněm se po 45 minutách zastavuje. Je nutné, aby během tohoto období zatěžování nedošlo k lomu a hloubka ohořelého dřeva by měla být menší než 35 mm, což odpovídá rychlosti zuhelnatění 0,8 mm/min [3].

I přesto však existuje alternativní přístup oproti těmto nákladným testováním pro každou z konstrukčních aplikací, kde bylo vyvinuto **testování pevnosti lepidel ve smyku při zvýšené teplotě na vzorcích malých rozměrů**.

5.3. Zkoušení požární odolnosti na tělesech malých rozměrů

Vývoj těchto metod u testování vzorků (malých rozměrů) by měl brát v úvahu tyto následující požadavky:

- snadná příprava vzorků,
- výsledky testů by měly být opakovatelné (reprodukovatelné),
- zkoušky by se měly provádět při zvýšených teplotách, nicméně měli bychom brát v potaz odolnost použitých dřevěných výrobků, které jsou vystaveny požáru a zohlednit tento faktor v přiměřené teplotní expozici. Také je třeba uvažovat, že testovací teplota může záviset na aplikaci adheziva v různých součástech dřeva [3].

Severoamerický kontinent

Testy prováděné na vzorcích malých rozměrů jsou prováděny expozicí (zahříváním) lepeného řeziva v peci při teplotě alespoň 220°C po dobu 60 minut (ASTM D 7247) na zkušebních vzorcích dle ASTM D 905. Cílem požadavku norem je zhodnotit účinnost adheze při zvýšených teplotách, které se blíží teplotě zapálení dřeva. **Maximální zkušební teplota je omezena hodnotou 220°C**, kterou udává americký institut (ANSI 405). Lepidlo je považováno za přijatelné, pokud se poměr střední reziduální pevnosti ve stříhu mezi cílovou teplotou 21°C a 220°C pro lepený vzorek rovná nebo je vyšší než dolní 95 % interval spolehlivosti k poměru střední zbytkové pevnosti ve stříhu u kontrolních referenčních vzorků dřeva. Za povšimnutí stojí fakt, že žádná souvislost mezi těmito zkouškami a odolností v ohni nebyla prokázána [3].

Japonsko

V této zemi je teplotní závislost lepených spojů v souladu s normou JIS K 683. Vzorky testované namáháním ve smyku podléhají předpisu JIS K 6852 a zkouší se při různých teplotách. Maximální teplota namáhání je 150°C dle výše uvedené japonské směrnice NTI z roku 2009. Při této teplotě je lepidlo označeno jako vyhovující za toho předpokladu, kdy dosahuje 66% pevnosti ve srovnání s namáháním při normální teplotě. Před samotnou zkouškou je vzorek stabilizován po dobu 168 hodin a následně se zahřívá na požadovanou teplotu v intervalu 24 hodin. Totožný postup je aplikován při tlakové smykové zkoušce o teplotě 100°C, pro kterou je požadována min. 75% pevnost ve srovnání s pevností v suchém stavu. Dále se požaduje zkouška tečení v souladu s ASTM D 2559 a ASTM D 3535 při maximální teplotě 71°C po dobu 7 dnů [3].

Mezinárodní organizace pro normalizaci

Mezinárodní norma ISO 19212 popisuje metodu ke stanovení odolnosti lepidel proti zvýšeným teplotám závislou na smykové pevnosti lepidla nebo pevnosti lepených spojů či slepenců. Lepidla, která se používají u lepených inženýrských produktů ze dřeva, jsou testována tlakovou smykovou zkouškou dle normy ISO 6238. Po předchozím kondicionování jsou zkušební vzorky testovány při vybraných teplotách v rozmezí 20°C až do maximální teploty 180°C. Pro všechny uvažované teploty musí být použito nejméně 12 zkušebních vzorků. Pro každou z těchto zkoušek musí být schéma selhání klasifikováno v souladu s normou ISO 10365. ISO 19212 klasifikuje lepidla a jejich teplotní závislost ve čtyřech různých skupinách. Jedná se o adhezivní pevnost při zvýšené teplotě, která je vyjádřena v % pevnosti lepidla při teplotě 23°C a tvoří tak kritérium pro zařazení do 4 skupin. Tato norma však neudává konkrétní teplotu, při které by měla být lepidla pro výrobu inženýrských produktů testována. Je velice podobná japonskému předpisu JIS K 6831, který uvažuje testování teplotní závislosti v návaznosti na adhezní vazbu [3].

5.4. Kríkové zkoušky při cyklických klimatických podmínkách

Odolnost proti krípu při statickém namáhání a vnějších expozičních podmínkách pro strukturální dřevo je testována dle normy ASTM D 3535 a ASTM D 2559. Tyto vzorky se vystaví prostředí o definovaných podmínkách a zatížení. Musí být splněny podmínky o celkové deformaci. Maximální naměřená teplota v těchto normách je 80°C, která zachycuje dlouhodobou tepelnou zátěž, odlišnou od chování v požáru s typicky prudkými teplotními gradienty v dřevěných průřezích [3].

Zejména jde o určení chování ručně spojovaných dřevěných prvků, kde byly vyvinuty dva blízce související standardy ASTM D 7374 a ASTM D 7470. Obě tyto normy se vztahují k tzv. „lepené politice“, která seskupuje tepelně odolná a neodolná lepidla. Odolná lepidla musí projít hodinovou požární odolností podle normy ASTM D 7374 a ASTM D 7470. V návaznosti na tyto standardy je u požárních zkoušek ve skutečné velikosti nutné vytvořit stěnu opatřenou po obvodu dřevěným ohraničením. Stěna musí vydržet při daném zatížení alespoň 60 minut [3].

V Kanadě jsou lepidla testována při zvýšené teplotě za pomoci **zkoušky tečení** dle CSA O112.9-04. Tato zkouška byla vyvinuta na základě zkušební metody dle ASTM D 3535. Zkoušky jsou prováděny pomocí speciálního zařízení, které umožňuje zatížení vzorku přes velkou pružinu. Zkušební těleso obsahuje sérii 28 střížných rovin a je připraveno tak, aby vyvolalo napětí $2,1 \text{ N/mm}^2$, vztaženého na celkovou smykovou plochu. Tyto testy jsou prováděny v peci při minimální teplotě vzduchu 180°C a příslušné relativní vlhkosti po dobu dvou hodin. Pokud má být zkouška brána jako relevantní, nechá se část vzorku při zkoušce poškodit a maximální deformace v každé smykové rovině musí být menší než 0,6 mm. Stojí za zmínku uvést, že zkušební teplota by měla být zvýšena na 220°C jelikož lepidlo, které splňovalo požadavky při teplotě 180°C neprokázalo svoje vlastnosti při zkouškách ve skutečné velikosti [3].

Norma CSA O177-06 představuje předpis pro výrobce strukturálního lepeného lamelového dřeva **v Kanadě**. Adheziva kvalifikovaná podle CSA O112.9-04 musí splňovat požadavky uvedené v příloze A CSA O177-06. V této příloze jsou popsány tři rozdílné testy. Prvním z těchto testů je test plamene v malém měřítku, který je zkoušen v případě, že lepidlo je schopno držet vazbu po celou dobu zóny pyrolýzy a normální zóny dřeva. Druhým testem dle této přílohy je test požární odolnosti pro posouzení odolnosti lepené spáry. Ten předepisuje jednotlivé podmínky pro přijetí dřevěných prvků. Jednotlivé části musí vydržet nastavené zatížení při požárních testech po dobu větší nebo rovnou s požární odolností vypočtenou dle CSA O177-06. Dále musí být průměrná rychlost zuhelnatění měřená na každé straně prvků v porovnání s referenčním vzorkem menší než 0,6mm/min. CSA O177-06 dále uvádí metodu pro testování výkonnosti lepidla při zvýšené teplotě. Adheziva musí být hodnocena podle APA/WIJMA AC 1000 **při maximální teplotě 232°C** . Pokud jde o normu ASTM D 7470, tak poměr střední zbytkové pevnosti pro lepené vzorky musí být větší nebo roven spodní konečné hranici 95% intervalu spolehlivosti u střední zbytkové pevnosti vzorků z masivního dřeva [3].

Podle požadavku **Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO)** zahrnuje norma ISO 12578 požadavky pro konstrukční lepené lamelové dřevo. Účinnost adheze v těchto výrobcích posuzuje norma ISO 20152. Její druhá část uvádí kritéria pro vysokou tepelnou odolnost lepených spojů konstrukčního dřeva. Tento dokument říká, že při smykové zkoušce o teplotě 220°C a vyšší je nutno posuzovat lepidlo pro vysokou tepelnou odolnost (dle ASTM D 7247). Také obsahuje zkoušku tečení lepené spáry při teplotě 180°C nebo vyšší na základě CSA O112.9. Celkové dotvarování při této zkoušce by nemělo překročit hodnotu 0,6 mm a maximální průměrné posunutí tečení v každém z jednotlivých lepených průřezů nesmí být větší než 2,9 mm po dobu zatěžování. Dále konstatuje, že při zkoušce tečení o teplotách v rozmezí od 180 do 220°C je obecně vhodné posoudit odolnost lepidla v malých členěných průřezech požární ochrany [3].

6. Cíle práce

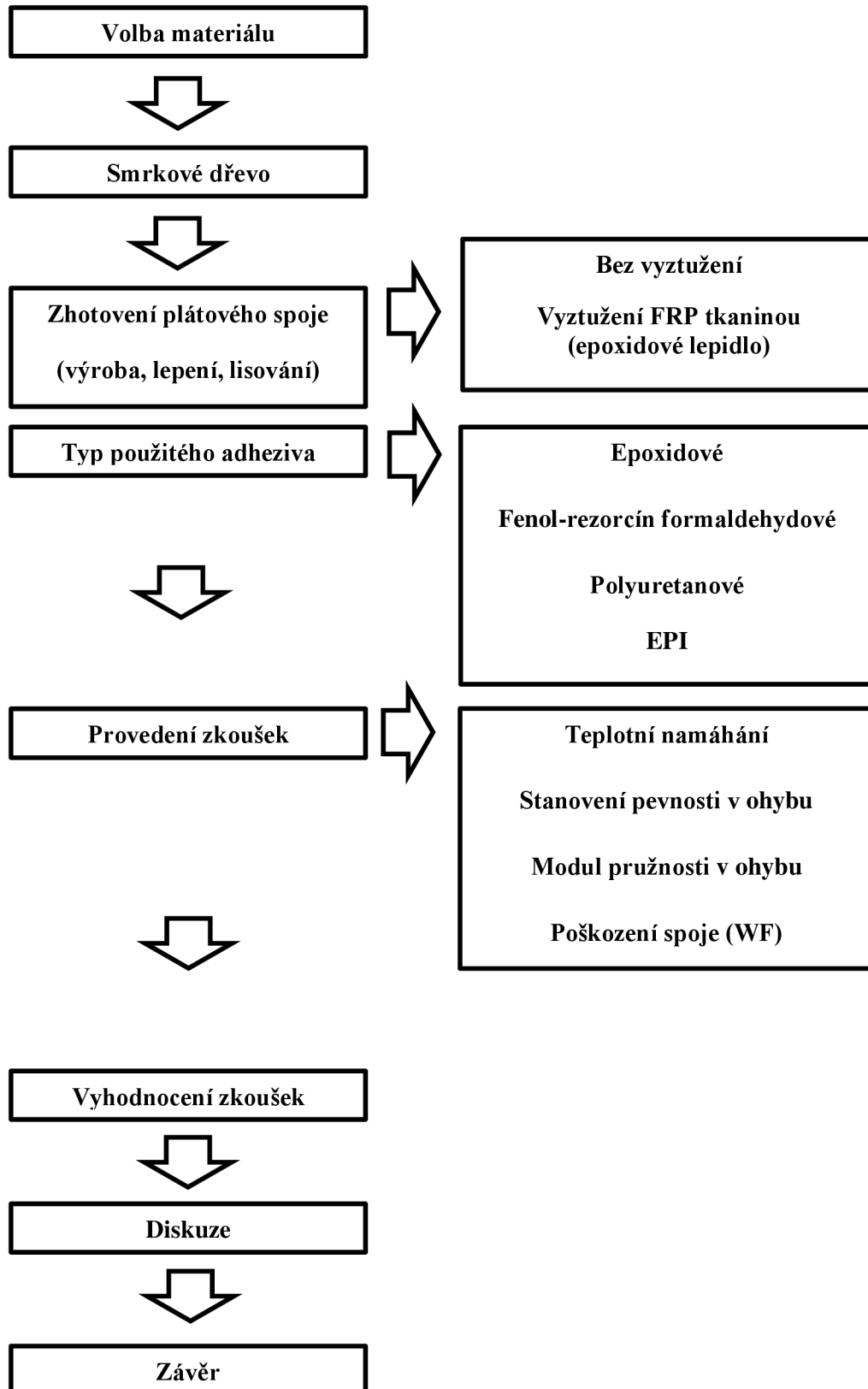
Cílem diplomové práce je zjištění odolnosti lepené spáry, která bude podrobena rozdílnému teplotnímu namáhání. Normativní postupy, které se touto problematikou zabývají, navrhuji dřevěné prvky z hlediska jejich požární odolnosti nejčastěji postupem podle zjednodušeného modelu požáru blíže specifikovaného v ČSN EN 1991-1-2. Jedním z dalších cílů je posouzení vlivu použitého lepidla, kde v současné době tento důležitý aspekt není zcela objasněn. Jedná se zejména o lepené nosné prvky, u nichž by bylo provedeno zhodnocení odolnosti adheziva proti zvýšeným teplotám a požáru. V této oblasti výzkumu nám chybějí experimentálně zjištěná data z jednotlivých požárních zkoušek buď na vzorcích ve skutečné velikosti, či na tělesech malých rozměrů. V našem případě bude použito zkušebních těles malých rozměrů. V úvahu bychom také měli brát ten fakt, že požární odolnost dřevěného prvku nemusí být na faktoru požární odolnosti lepené spáry zcela signifikantně závislá.

V samotné experimentální části této diplomové práce byly zvoleny dva typy plátového spoje (s FRP tkaninou a bez ní) a čtyři druhy komerčně používaných lepidel (epoxidové, fenol-rezorcín formaldehydové, polyuretanové a EPI). Lepený spoj bude po zhotovení vystaven postupné teplotní expozici (140°C a 170°C) časově odstupňované (20, 40, 60, 80, 180 a 1440 min). Z těchto údajů bude provedeno (pro každou z expozic) vyhodnocení vlivu časové závislosti působení daného teplotního namáhání na výsledné ohybové pevnosti lepeného spoje dle použitého typu adheziva. Dále se přistoupí ke stanovení kohezního poškození plátového spoje v lepené spáře, abychom mohli usoudit, zda jsou daná lepidla tento požadavek odolnosti schopna splnit i po vystavení teplotní zátěži.

7. Experimentální část

7.1. Metodický postup prací v experimentální části

Níže uvedené tabulkové schéma naznačuje posloupnost prací v experimentální části.



7.2. Charakteristika zvoleného druhu dřeviny

Pro samotný experiment bylo vybráno **smrkové dřevo**. Je to nejrozšířenější a nejdostupnější tuzemská dřevina. V našich lesích má více jak poloviční zastoupení (cca 53 %). Patří mezi jehličnaté a tudíž měkké dřeviny. Doba růstu je okolo 100 roků, dorůstá do výšky 25 až 40 metrů a dosahuje průměru kmene okolo 1 m. Tento druh dřeviny se nejvíc využívá pro dřevěné konstrukce. Má bílou až nažloutlou barvu, je částečně smolnaté a se suky, které pevně zarůstají. Vyznačuje se příznivými zpracovatelskými vlastnostmi a to lehkostí, pružností, houževnatostí, dobrou štípatelností a vhodností k lepení. Na suchu je trvanlivé, avšak při vystavení vlhku podléhá rychlé hnilobě. Škála jeho využití je velice široká od pozemních i nadzemních staveb až po hudební nástroje. Nutno podotknout, že všechny charakteristiky závisí na obsahu vlhkosti ve dřevě [27]. V tab. č. 4 je uveden přehled základních vlastností smrkového dřeva.

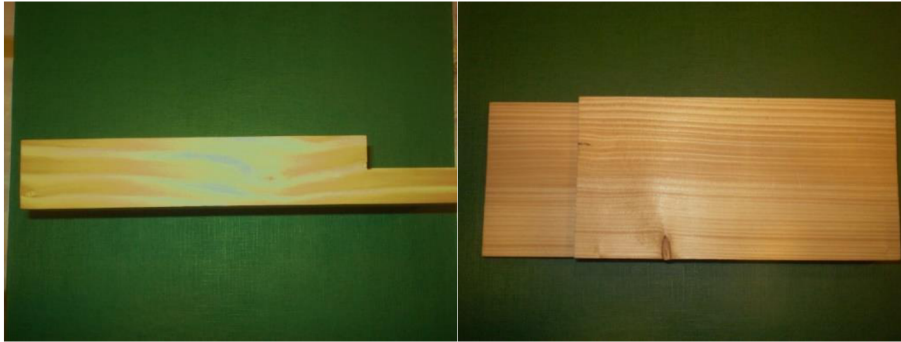
Tab. č. 4: Přehled základních vlastností smrkového dřeva [18].

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Objemová hmotnost	cca 420 (v suchém stavu)	[kg/m ³]
Pevnost v tahu s vlákný	84	[N/mm ²]
Pevnost v tahu ⊥ k vláknům	1,5	
Pevnost v tlaku s vlákný	30	
Pevnost v tlaku ⊥ k vláknům	4,1	
Pevnost v ohybu MOR	60	
Pevnost v ohybu MOE	9100	
Pevnost ve smyku	5,3	

7.3. Volba druhu dřevěného spoje

7.3.1. Standardní plátový spoj

Jedná se o zkušební těleso rozměrů d/š/v 450/100/40 mm, které je složeno ze dvou částí a spojeno je pomocí plátového spoje. Jeho výroba zahrnovala několik kroků (ořez hran - sámování, srovnání hran, nařezání na rozměr 115 mm, zarovnání do pravého úhlu, úprava šířky a výšky hranolu, ořez na požadovaný rozměr-zformátování, osazení na pile, frézování a samotné vyřezání plátu). Na následujícím obr. č. 15 je tento plátový spoj vyobrazen.



Obr. č. 15: Plátový spoj

7.3.2. Standardní plátový spoj s vloženou FRP tkaninou

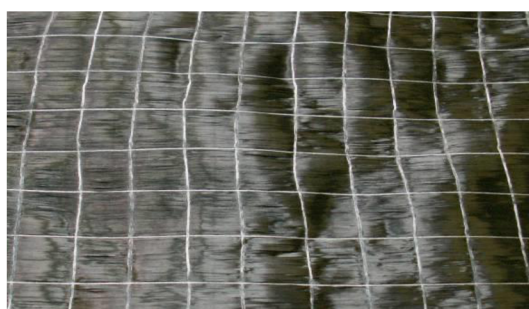
Jedná se také o klasický plátový spoj o rozměrech 450/100/40 mm s tím rozdílem, že v místě přeplátování je vložena FRP tkanina z uhlíkových vláken. Jedná se o tkaninu Tyfo-SCH –7UP tl. 0,17 mm, která je tvořena jednotlivými svazky vláken. Ty jsou z důvodu lepší manipulační schopnosti držena pohromadě příčným i podélným propletením textilními vlákny bílé barvy. Jedná se o velmi lehkou jednosměrnou uhlíkovou tkaninu, která se používá jako dodatečná lepená výztuž různých druhů konstrukcí (železobeton, ocel, dřevo, atd.). V tab. č. 5 je uveden seznam vlastností suchých vláken a v tab. č. 6 je uveden seznam vlastností vytvrzeného kompozitu FRP tkaniny. Na obr. č. 16 je pak tato tkanina vyobrazena.

Tab. č. 5: Charakteristické vlastnosti suchých vláken [17].

Vlastnosti suchých vláken	Hodnota	Jednotka
Pevnost v tahu	3790	[N/mm ²]
Modul pružnosti v tahu	230000	[N/mm ²]
Maximální tahové přetvoření	1,7	[%]
Objemová hmotnost	1740	[kg/m ³]
Gramáž	200	[g/m ²]
Tloušťka vláken	0,08	[mm]

Tab. č. 6: Charakteristické vlastnosti vytvrzeného kompozitu [17].

Vlastnosti vytvrzeného kompozitu	Hodnota	Jednotka
Tahová pevnost v hlavním směru	1062	[N/mm ²]
Modul pružnosti v tahu	102000	[N/mm ²]
Maximální tahové přetvoření	1,05	[%]
Tahová pevnost normalizovaná tloušťkou	180,5	[N/mm ²]/mm
Modul pružnosti normalizovaný tloušťkou	17300	[N/mm ²]/mm
Tloušťka	0,17	[mm]



Obr. č. 16: FRP tkanina

7.4. Použité typy adheziv

7.4.1. Epoxidové lepidlo

Epoxidová lepidla ve formě pryskyřic patří mezi velmi kvalitní adheziva a jsou vhodná k lepení různých druhů materiálů. Nejsou použitelná ke spojování termoplastů, mezi které patří PMMA, PVC, PP atd. Příprava těchto pryskyřic spočívá v reakci vícemocných fenolů (např. dian) s epichlorhydrinem. Konečným produktem je buď pryskyřice bez dalších úprav, či se přidávají různé látky jako změkčovadla nebo reaktivní rozpouštědla. Tvrdí se za pomoci tvrdidel např. polyaminy. S těmito tvrdidly se zpracovávají od normální teploty až po teplotu 200°C [16].

Pro samotný účel byla použita nízkoviskózní epoxidová pryskyřice EPOLAM 2017, která se užívá k výrobě kompozitních dílů pro různé typy aplikací (průmysl, lodě, sport, atd.). Tento epoxidový systém umožňuje ovlivnění rychlosti vytvrzení díky variabilitě tvrdidel. Vyznačuje se výbornými mechanickými vlastnostmi, nízkou viskozitou, smáčivostí tkanin, dřeva, balsy a pěn. Další pozitivní vlastností je odolnost proti vodě a vlhkému prostředí. V následující tab. č. 7 a je uveden výčet fyzikálních a v tab. č. 8 souhrn mechanických vlastností epoxidového lepidla.

Tab. č. 7: Fyzikální vlastnosti epoxidového lepidla [19].

Fyzikální vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Viskozita (25°C)	2850	[mPa.s]
Objemová hmotnost (lepidlo) L	1170	[kg/m ³]
Objemová hmotnost (tvrdidlo) T	960	[kg/m ³]
Směšovací poměr	100:30 (L:T)	[hm. díly]

Tab. č. 8: *Mechanické vlastnosti epoxidového lepidla, pozn. [19].*

mechanické vlastnosti (po vytvrzení)	Hodnota	Jednotka
Ohybový modul pružnosti	3000	[N/mm ²]
Pevnost v ohybu	132	[N/mm ²]
Tahový modul	3700	[N/mm ²]
Pevnost v tahu	73	[N/mm ²]
Teplota skelného přechodu T _g	89	[°C]

Pozn. Hodnoty se vztahují k tvrdidlu EPOLAM 2017

7.4.2. Fenol-rezorcín formaldehydové lepidlo (PRF)

Jedná se o adhezivum, které je tvrditelné za normální teploty. Z důvodu vysoké reaktivnosti resorcinolu s formaldehydem se příprava dá uskutečnit buď v neutrálním, či v kyselém prostředí. Jelikož je resorcinol poněkud drahou surovinou, vyrábí se levnější směsná fenol-resorcinol formaldehydová lepidla (PRF). Je skupenství kapalného s červenohnědou barvou a přibližným hm. obsahem sušiny okolo 60% [16]. V následující tab. č. 9 jsou uvedeny některé fyzikální a charakteristické vlastnosti PRF lepidla 1711 a tvrdidla 2520.

Tab. č. 9: *Vlastnosti fenol-rezorcín formaldehydového lepidla 1711+tvrdidlo typ 2520 [20].*

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Viskozita	5000 (L) 8000 (T)	[mPa.s]
Objemová hmotnost	1150 (L) 1220 (T)	[kg/m ³]
pH (L)	8 (L) 5 (T)	-
Směšovací poměr	100:25 (L:T)	[hm. díly]
Vlhkost dřeva	7-10	[%]
Lisovací čas (dle teploty v lepené spáře)		
Teplota v lepené spáře	Min. doba pro vytvrzení směsi	
10 °C	20	[hod]
15 °C	8	[hod]
25 °C	4	[hod]
30 °C	2	[hod]

7.4.3. Polyuretanové lepidlo

Tento druh lepidla vzniká adiční polymerací polyisokyanátů s vícemocnými alkoholy či polyesterovými pryskyřicemi, které obsahují hydroxylové skupiny. Výhodnými vlastnostmi tohoto adheziva jsou dobrá mechanická pevnost spojů, pružnost a odolnost proti dynamickému namáhání a dále také odolnost vůči vlhkosti a povětrnostním vlivům. Jejich zpracování je možné v širokém rozmezí teplot. Jsou vhodná pro spojování různých druhů materiálů [16].

Pro náš účel bylo zvoleno jednosložkové, vláknem vyztužené, vlhkostí tvrdnoucí polyuretanové lepidlo KESTOPUR 1030 určené pro lepení dřevěných materiálů. Tab. č. 10 uvádí některé vlastnosti použitého polyuretanového lepidla.

Tab. č. 10: *Vlastnosti polyuretanového lepidla [21].*

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Viskozita	cca 5000	[mPa.s]
Objemová hmotnost	1500	[kg/m ³]
Otevřený čas	max. 30	[min]
Lisovací čas	min. 90-120	[min]
Potřebný tlak	0,5-1,0	[N/mm ²]
Vlhkost dřeva	14	[%]

7.4.4. EPI lepidlo

Posledním typem adheziva byl KESTOKOL WR 125. Jedná se o dvousložkový emulzní polymer na izokyanátové bázi mající velmi dobrou odolnost proti klimatickým vlivům. Používá se pro různé aplikace např. u objektů, kde se neustále mění povětrnostní podmínky, k lepení nábytku, člunů (ne však pro části, které jsou pod hladinou vody) a k dalšímu lepení pro různé aplikace.

K samotnému lepidlu se přidává tvrdidlo, které je označeno písmenem M. Tento typ tvrdidla neobsahuje izokyanáty. Při překročení doby zpracovatelnosti směsi dochází k tvorbě pěny. Tato doba je ovlivněna vyšší teplotou, která má za následek její zkrácení. Systém také umožňuje přidání staré směsi do nové za předpokladu nepřekročení uvedené doby zpracovatelnosti. Tab. č. 11 uvádí vybrané parametry EPI lepidla.

Tab. č. 11: Vlastnosti EPI lepidla [22].

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Viskozita	cca 5000	[mPa.s]
Směšovací poměr	100:15 (L:T)	[hm. díly]
Otevřený čas	max. 35	[min]
Lisovací čas	min. 30	[min]
Potřebný tlak	0,5-1,0	[N/mm ²]
Vlhkost dřeva	14	[%]

7.5. Lisování zkušebních těles

Lisování zkušebních těles proběhlo na hydraulickém lise ITALPRESS XL 6J, který měl lisovací plochu 1300x3000mm. Samotné lisování zkušebních vzorků bylo realizováno za studena při tlaku 0,5 N/ mm² po dobu 12 hodin. Pro každé lepidlo byl předem z technického listu stanoven jeho plošný nános. V následující tab. č. 12 je uveden přehled plošných nánosů pro jednotlivá adheziva. Celková plocha plátového spoje činila 0,012m².

Tab. č. 12: Hodnoty plošných nánosů pro jednotlivá adheziva [19],[20],[21],[22].

Lepidlo	Plošný nános	Jednotka
Epoxidové (oboustranně)	300	[g/m ²]
PRF (oboustranně)	350	
Polyuretanové (jednostranně)	200	
EPI (oboustranně)	240	

Jako aplikační způsob byl zvolen nános lepidel za pomoci štětce. U epoxidového lepidla byla provedena expozice lepených spojů po dobu 48hod teplotě 80°C zajišťující proces post-curing lepidla.

7.6. Zkušební metody

7.6.1. Teplotní expozice

Po zhotovení plátového spoje (lepení a lisování) byly vzorky nařezány na stolní kotoučové pile tak, že výsledný hranol měl rozměr d/š/v 450/48/40 mm. Tyto vzorky byly pak následně podrobeny postupnému teplotnímu namáhání v horkovzdušné sušárně. Jako určující hodnoty teplot byly vybrány 20, 140 a 170°C. Zvýšené teploty bylo dosaženo v lepené spáře, kdy do této spáry byl zaveden termočlánek pro ověření požadované teploty. Poté byla určena časová

posloupnost teplotního namáhání pro zhotovení grafického vyhodnocení dané závislosti. Pro zvýšené teploty (140 a 170°C) se jednalo o 20, 40, 60, 80, 180, a 1440 min. vystavení příslušné teplotě. Po dosažení časového intervalu bylo přistoupeno ke stanovení dalších níže uvedených parametrů. Na následujícím obr. č. 17 je vidět sada zkušebních vzorků pro 1 typ lepidla před samotnou zkouškou a na dalším obr. č. 18 umístění vzorků v horkovzdušné sušárně.



Obr. č. 17: Sada zkušebních vzorků (1 typ lepidla) před teplotním zatěžováním



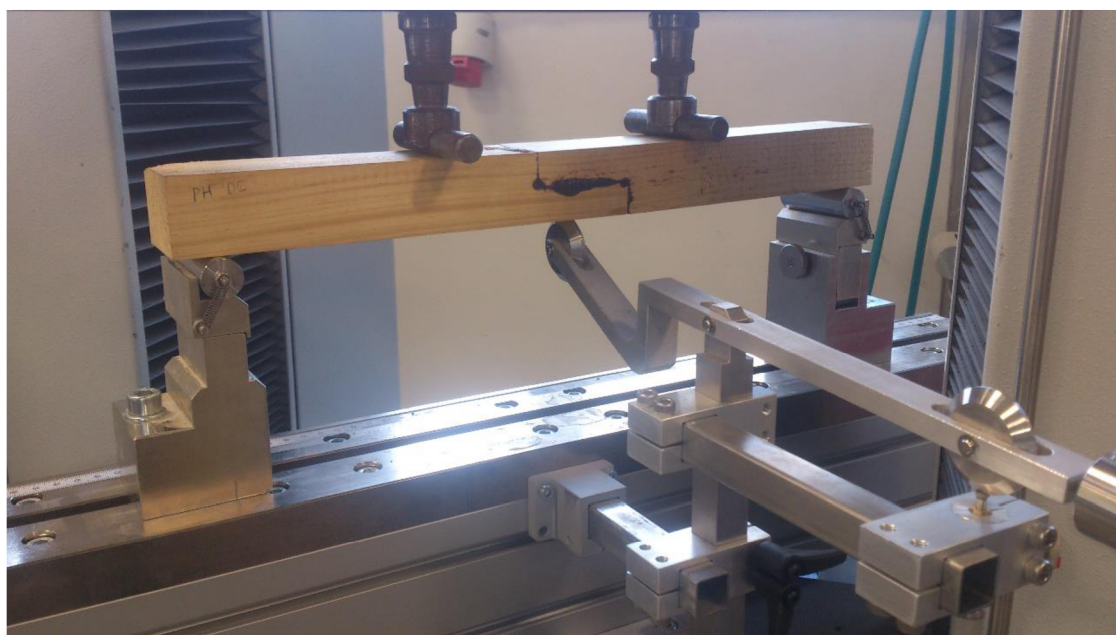
Obr. č. 18: Sada zkušebních vzorků (1 typ lepidla) umístěných v horkovzdušné sušárně

7.6.2. Stanovení pevnosti v ohybu

Stanovení pevnosti v ohybu proběhlo dle EN 408 pro dřevěné konstrukce, kde se jednalo o čtyřbodový ohyb. Zkušební těleso se symetricky zatěžovalo ohybem dvěma břemeny při rozpětí podpor 410 mm a břemen 160 mm. Zatížení bylo prováděno konstantní rychlostí posunutí zatěžovací hlavy tak, že maximálního zatížení bylo dosaženo za (300 ± 20) s. Následně se zaznamenalo maximální působící zatížení (F_{\max}) a byl proveden výpočet pevnosti v ohybu, který je vyjádřen tímto vztahem:

$$f_m = \frac{3 F a}{b h^2} \quad (1)$$

Pro každý časový interval bylo uvažováno 6 zkušebních vzorků pro referenční teplotu 20°C a 4 zkušební vzorky pro teploty 140 a 170°C a z nich následně vypočítána průměrná hodnota pevnosti v ohybu. Na následujícím obr. č. 19 je vyobrazen přístroj s vloženým zkušebním vzorkem před samotnou zkouškou.



Obr. č. 19: Zkouška pevnosti v ohybu

7.6.3. Globální modul pružnosti v ohybu

Stanovení globálního modulu pružnosti proběhlo opět dle EN 308, kde se vychází ze stejných podmínek z předešlého stanovení pevnosti v ohybu. Tyto dvě stanovení probíhají při totožném zatížení čtyřbodovým ohybem, jak bylo popsáno viz. výše. Při zkoušce musela být dodržena konstantní zatěžovací rychlost a dále rychlost posunutí hlavy nesměla překročit

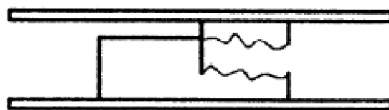
hodnotu (0,003h) mm/s. Výsledný globální modul pružnosti je vyjádřen následujícím vztahem:

$$E_{m,g} = \frac{3 a l^2 - 4 a^3}{2 b h^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right) - \frac{6 a}{5 G b h}} \quad (2)$$

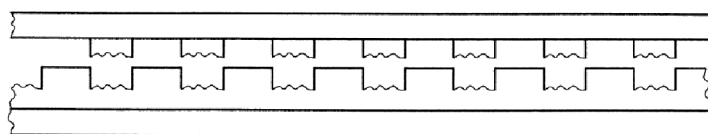
7.6.4. Stanovení způsobu poškození spoje, kohezní porušení wood failure

Tuto charakteristiku definuje mezinárodní norma ISO 10365, která je začleněna překladem do normativních předpisů v ČR. Norma specifikuje hlavní typy poškození lepených sestav a pomocí grafického záznamu zobrazuje možné výsledky jednotlivých porušení. Tyto předpisy se týkají všech mechanických testů provedených na lepených sestavách bez ohledu na druh lepidla či adherendu, které tvoří lepený spoj. **Adhezní** porušení je specifikováno prasknutím lepeného spoje, kde dochází k oddělení vrstev na rozhraní adhezivum/ adherend. Opačný jev nastává při **kohezním** porušení lepeného spoje, kdy dojde k prasknutí či oddělení ve vrstvě adheziva či adherendu [26].


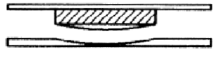
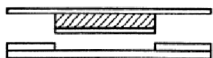




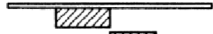
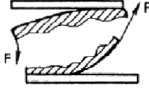
Kohezní porušení (tzv. *wood failure*) bylo v našem případě stanoveno po zkoušce pevnosti v ohybu, kdy došlo vlivem mechanického napětí k přerušení soudržnosti v lepené spáře zkušebního tělesa. Odhaduje se vizuálně a poté se zaznamená procentuální podíl porušení dřeva s přesností na nejbližších 10%. Jako kohezní porušení jsme uvažovali porušení zkušebního tělesa ve dřevní hmotě a nikoli v lepené spáře vzorku. Nulové kohezní porušení nastalo v případě, kdy na ploše plátového spoje zůstalo pouze vytvrzené lepidlo a naopak 100% kohezní porušení je v případě nepřítomnosti lepidla ve spoji. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny možné případy kohezních poškození.



Obr. č. 20: Kombinované poškození lepeného spoje AF (50%) + CF(50%) [26]



Obr. č. 21: Příklad střídavého poškození lepeného spoje [26]

	Failure patterns	Designation
Substrate	 <p>Failure of one or both adherends (Substrate failure)</p>	SF
	 <p>Failure of an adherend (Cohesive substrate failure)</p>	CSF
	 <p>Failure through delamination (Delamination failure)</p>	DF
Adhesive	<p>Types of cohesion failure</p>  <p>Cohesion failure</p>	CF
	  <p>Special cohesion failure</p>	SCF
	  <p>Adhesion failure</p>	AF
	 <p>Adhesion and cohesion failure with peel</p>	ACFP

Obr. č. 22: Příklady různých druhů poškození lepených spojů [31]

8. Výsledky zkoušek

8.1. Charakteristika dřeva

Průměrná objemová hmotnost smrkového dřeva použitého ke zkušebním účelům byla zjištěna ve výši 405 kg.m⁻³ ve vysušeném stavu. Vlhkost zkušebních vzorků byla stanovena gravimetricky v průběhu zkoušek a byla zjištěna ve výši cca 9,2%.

8.2. Plátový spoj lepený epoxidovým lepidlem

Výsledky průměrných hodnot pevnosti a modulu pružnosti pro lepený plátový spoj za použití epoxidového lepidla EPOLAM 2017 při expozici 20°C/65% jsou uvedeny v následující tab. č. 13.

Tab. č. 13. Teplota 20°C/65% pro plátový spoj s použitím epoxidového lepidla

Typ spoje	Teplotní expozice 20°C				WF [%]
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
Bez FRP	7,44	0,96	3626	321	77,5
s FRP	7,93	1,25	5293	1124	-

Výsledky průměrných hodnot pevnosti a modulu pružnosti pro lepený plátový spoj (bez vyztužení FRP) za použití epoxidového lepidla EPOLAM 2017 při expozici 140°C jsou uvedeny v následující tab. č. 14 a při expozici 170°C jsou uvedeny v tab. č. 15.

Tab. č. 14. Teplota 140°C při postupné časové expozici (bez vyztužení) s použitím epoxidového lepidla

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 140 °C				WF [%]
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	5,95	0,15	3140	496	71,3
40	5,53	0,30	2965	542	53,8
60	5,02	0,62	3179	536	63,8
80	4,30	0,63	3290	704	45,0
180	4,07	0,26	2491	277	28,8
1440	5,66	1,25	3159	125	42,5

Tab. č. 15. Teplota 170°C při postupné časové expozici (bez vyztužení) s použitím epoxidového lepidla

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 170 °C				
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	4,64	0,90	2880	207	43,8
40	4,45	1,02	3501	1008	37,5
60	3,35	0,15	2839	394	25,0
80	3,20	0,16	2897	433	25,0
180	2,61	0,20	2337	355	26,3
1440	2,36	0,06	2625	535	16,3

Výsledky průměrných hodnot pevnosti a modulu pružnosti pro lepený plátový spoj (s vyztužením FRP) za použití epoxidového lepidla EPOLAM 2017 při expozici 140°C jsou uvedeny v následující tab. č. 16 a při expozici 170°C jsou uvedeny v tab. č. 17.

Tab. č. 16. Teplota 140°C při postupné časové expozici (s vyztužením) s použitím epoxidového lepidla

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 140 °C				
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	5,91	1,14	3289	515	-
40	5,80	0,75	3957	227	
60	5,23	0,57	2968	369	
80	5,12	0,96	3387	551	
180	4,76	0,81	3408	760	
1440	5,49	1,04	4324	1462	

Tab. č. 17. Teplota 170°C při postupné časové expozici (s vyztužením) s použitím epoxidového lepidla

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 170 °C				
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	6,04	0,80	3655	659	-
40	5,38	0,45	2874	483	
60	3,78	0,66	2439	397	
80	2,93	0,30	2730	295	
180	4,97	0,58	3516	626	
1440	3,13	0,14	2922	459	

8.3. Plátový spoj lepený fenol-rezorcín formaldehydovým lepidlem (PRF)

Výsledky průměrných hodnot pevnosti pro lepený plátový spoj za použití PRF lepidla 1711 při expozici 20°C/65% jsou uvedeny v následující tab. č. 18.

Tab. č. 18. Teplota 20°C/65% pro plátový spoj s použitím PRF lepidla

Typ spoje	Teplotní expozice 20°C				
	Pevnost v ohybu		Modul pružnosti		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
Bez FRP	7,02	1,45	-	-	65,0

Výsledky průměrných hodnot pevnosti pro lepený plátový spoj za použití PRF lepidla 1711 při expozici 140°C jsou uvedeny v následující tab. č. 19 a při expozici 170°C jsou uvedeny v tab. č. 20.

Tab. č. 19. Teplota 140°C při postupné časové expozici pro lepený spoj za použití FRP lepidla

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 140 °C				
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	6,27	0,58	-	-	75,0
40	5,28	0,49	-	-	52,5
60	4,68	0,61	-	-	53,8
80	4,54	1,08	-	-	51,3
180	4,24	0,74	-	-	66,3
1440	3,69	0,61	-	-	58,8

Tab. č. 20. Teplota 170°C při postupné časové expozici pro lepený spoj za použití FRP lepidla

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 140 °C				
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	6,32	0,14	-	-	72,5
40	5,52	0,33	-	-	43,8
60	5,08	0,19	-	-	58,8
80	4,46	0,06	-	-	56,3
180	4,14	0,16	-	-	57,5
1440	4,02	0,81	-	-	12,5

8.4. Plátový spoj lepený polyuretanovým lepidlem

Výsledky průměrných hodnot pevnosti a modulu pružnosti pro lepený plátový spoj za použití polyuretanového lepidla KESTOPUR 1030 při expozici 20°C/65% jsou uvedeny v následující tab. č. 21.

Tab. č. 21. Teplota 20°C/65% pro lepený spoj za použití PUR

Typ spoje	Teplotní expozice 20°C				
	Pevnost v ohybu		Modul pružnosti		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
Bez FRP	9,21	1,51	3929	1416	96,7

Výsledky průměrných hodnot pevnosti a modulu pružnosti pro lepený plátový spoj za použití polyuretanového lepidla KESTOPUR 1030 při expozici 140°C jsou uvedeny v následující tabulce tab. č. 22 a při expozici 170°C jsou uvedeny v tab. č. 23.

Tab. č. 22. Teplota 140°C při postupné časové expozici pro lepený spoj za použití PUR

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 140 °C				
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	8,77	1,94	2906	731	97,5
40	7,93	1,88	2983	575	100,0
60	7,58	0,72	2681	184	97,5
80	7,20	0,44	2846	333	95,0
180	7,03	1,15	2771	440	71,3
1440	5,17	0,66	3051	409	66,3

Tab. č. 23. Teplota 170°C při postupné časové expozici pro lepený spoj za použití PUR

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 170 °C				
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		WF [%]
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	8,94	1,61	3277	390	67,5
40	8,32	1,07	2771	222	63,8
60	7,48	1,39	2890	427	48,8
80	6,79	0,45	2879	194	32,5
180	2,22	0,15	2723	377	12,5
1440	0,13	0,09	614	893	1,3

8.5. Plátový spoj lepený EPI lepidlem

Výsledky průměrných hodnot pevnosti a modulu pružnosti pro lepený plátový spoj za použití EPI lepidla KESTOKOL WR 125 při expozici 20°C/65% jsou uvedeny v následující tabulce tab. č. 24.

Tab. č. 24. Teplota 20°C/65% pro plátový spoj s použitím EPI lepidla

Typ spoje	Teplotní expozice 20°C				WF [%]
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
Bez FRP	7,93	0,81	3527	763	25,0

Výsledky průměrných hodnot pevnosti a modulu pružnosti pro lepený plátový spoj za použití EPI lepidla KESTOKOL WR 125 při expozici 140°C jsou uvedeny v následující tabulce tab. č. 25 a při expozici 170°C jsou uvedeny v tab. č. 26.

Tab. č. 25. Teplota 140°C při postupné časové expozici pro lepený spoj za použití EPI lepidla

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 140 °C				WF [%]
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	6,91	0,26	2601	119	43,8
40	6,80	1,11	2744	752	57,5
60	6,08	0,60	2814	294	37,5
80	5,18	0,33	2770	414	45,0
180	4,75	1,03	2616	467	52,5
1440	4,88	1,33	2890	1945	57,5

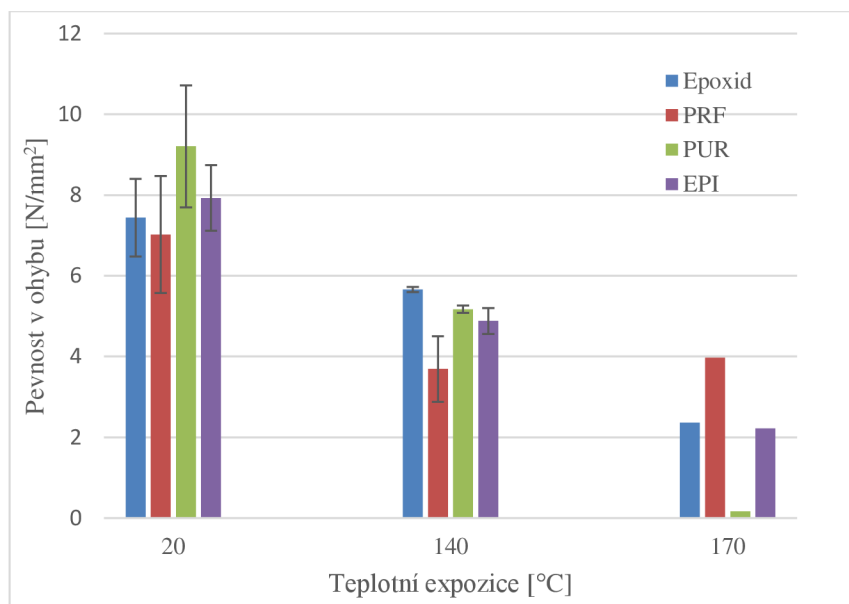
Tab. č. 26. Teplota 170°C při postupné časové expozici pro lepený spoj za použití EPI lepidla

Doba expozice [min]	Teplotní expozice 170 °C				WF [%]
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		
	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	
20	5,37	0,62	2584	563	40,0
40	4,08	0,82	2345	285	37,5
60	4,40	0,49	2400	248	35,0
80	4,88	0,62	2496	248	47,5
180	4,69	1,03	3229	772	43,3
1440	2,22	0,44	3101	387	11,3

9. Shrnutí a diskuze výsledků

9.1. Vliv druhu lepidla na pevnost v ohybu plátového spoje při různých teplotních expozičních

Pro stanovení vlivu druhu lepidla na pevnost v ohybu lepeného plátového spoje bylo použito výsledků dosažených z ohybové zkoušky při podmínkách 20°C/65%. Pro teplotní expoziční 140 a 170°C byly uvažovány hodnoty pevností v ohybu po 24 hod vystavení teplotnímu namáhání pro daný typ lepidla. Na následujícím obr. č. 23 je pomocí sloupcového grafu provedeno porovnání adheziv při daných teplotních expozičních.



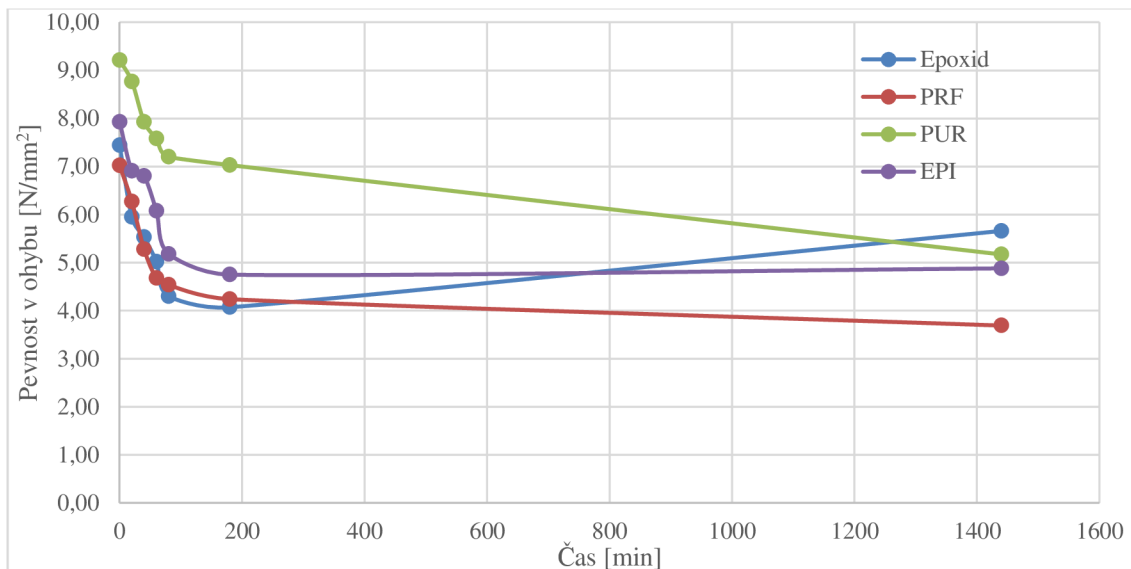
Obr. č. 23: Porovnání pevností v ohybu jednotlivých druhů lepidel pro dané teplotní expoziční

Co se týká vlivu druhu lepidla na pevnost v ohybu plátového spoje při různých teplotních expozičních, je z dosažených výsledků patrné, že dle předpokladu u všech použitých lepidel dochází vlivem působení vyšších teplot k postupnému snižování pevnosti spoje. V případě teplotní expoziční 140°C došlo k nejnižším poklesům pevnosti spoje pro PRF lepidlo (47,4%) a PUR lepidlo (43,9 %), pro teplotní expoziční 170°C pak nejvyšších poklesů pevnosti spoje bylo dosaženo pro PUR lepidlo (98,6 %). Při teplotě 170°C bylo dosaženo pro PRF lepidlo s úbytkem 43,4 %, což je zhruba stejná hodnota poklesů, jako při expoziční 140°C, v podstatě pro tento typ lepidla nedošlo ke snížení pevnosti.

9.2. Časová závislost pevnosti plátového spoje při teplotní zátěži 140 °C

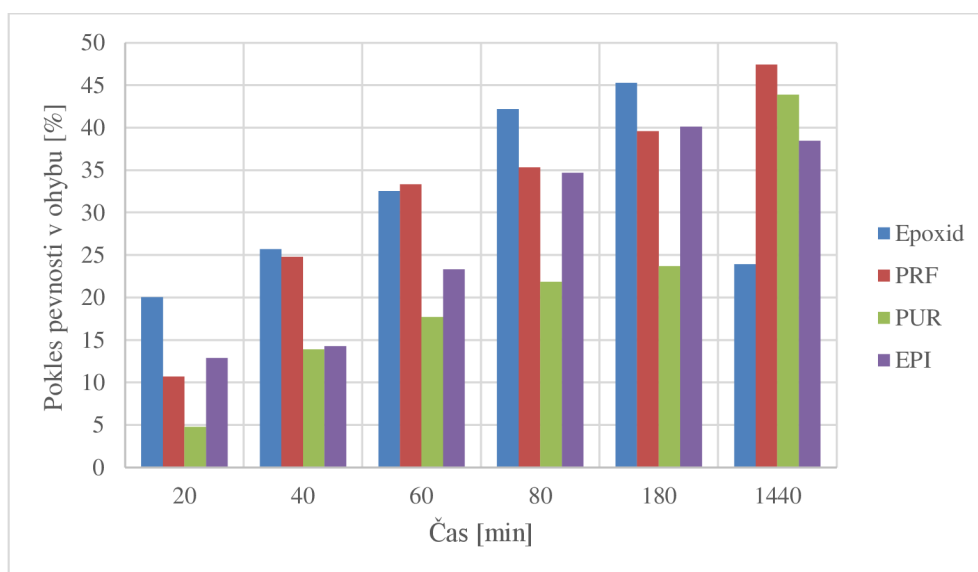
Pro zjištění vlivu časové závislosti na pevnost lepeného spoje bylo použito výsledků dosažených z ohybové zkoušky při podmínkách 140°C. Na následujícím obr. č. 24 je

znázorněn vliv časové závislosti a na obr. č. 25 procentuální vývoj pevnosti v ohybu pro danou teplotní expozici.



Obr. č. 24: Porovnání vývoje pevností v ohybu jednotlivých druhů lepidel v čase pro danou teplotní expozici 140°C

Ohledně vlivu časové závislosti na pevnost v ohybu plátového spoje při jeho vystavení teplotě 140°C je z výsledků patrné, že při teplotním namáhání došlo k jejímu postupnému poklesu. Ten byl zaznamenán po 180 min u všech druhů lepidel, avšak po teplotní výdrži 24 hod u epoxidového lepidla došlo vlivem jeho vytvrzení v lepené spáře spoje k navýšení pevnosti v ohybu o 28,1% na 5,66 N/mm².

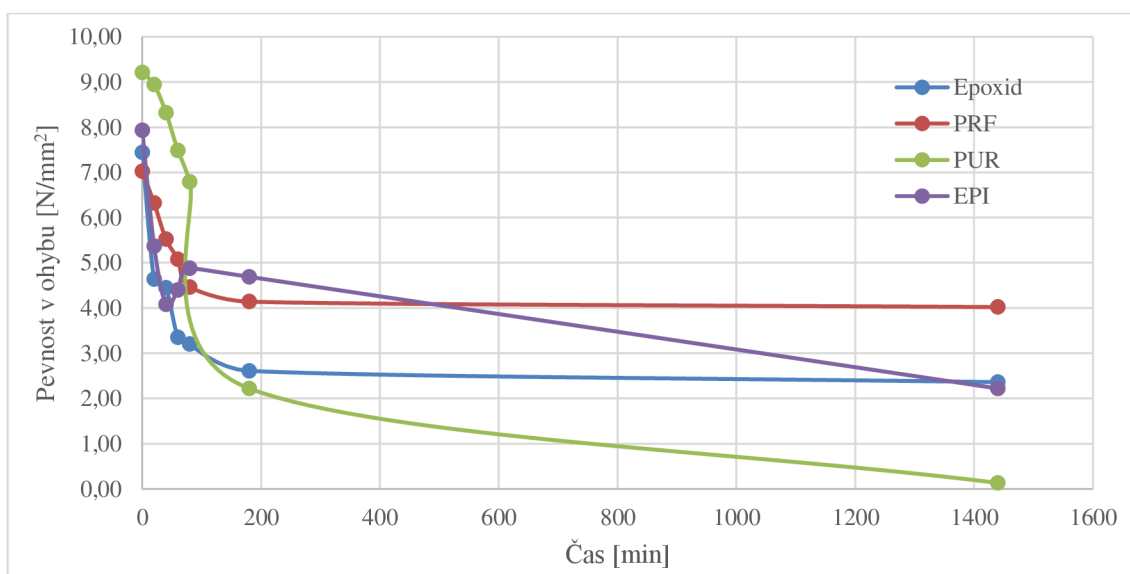


Obr. č. 25: Procentuální úbytek pevnosti v ohybu v závislosti na době působení teplotní expozice 140°C

Procentuální úbytek pevnosti v ohybu lepeného spoje vlivem působení teplotního namáhání 140°C po 24 hod (1440 min) výdrži vykazuje lineárně vzrůstající trend u všech druhů lepidel. Největšího poklesu bylo po 24 hod zaznamenáno u PRF lepidla (47,4 %) a naopak nejmenšího u epoxidového (23,9%). Skutečnost nárůstu pevnosti spoje u epoxidového lepidla po 1440 min lze přičíst dodatečnému procesu post-curingu lepidla, kdy i přes 48 hodinové vytvrzení při teplotě 80°C před teplotními expozicemi nebylo tímto zajištěno kompletní dotvrzení tohoto typu adheziva. Z časového hlediska je markantní, že po uplynutí doby 180 min nedochází u lepidel (PRF, Epoxid, EPI) k významným poklesům pevnosti, naopak klesající tendence poklesu pevností po této době bylo zaznamenáno u PUR lepidla.

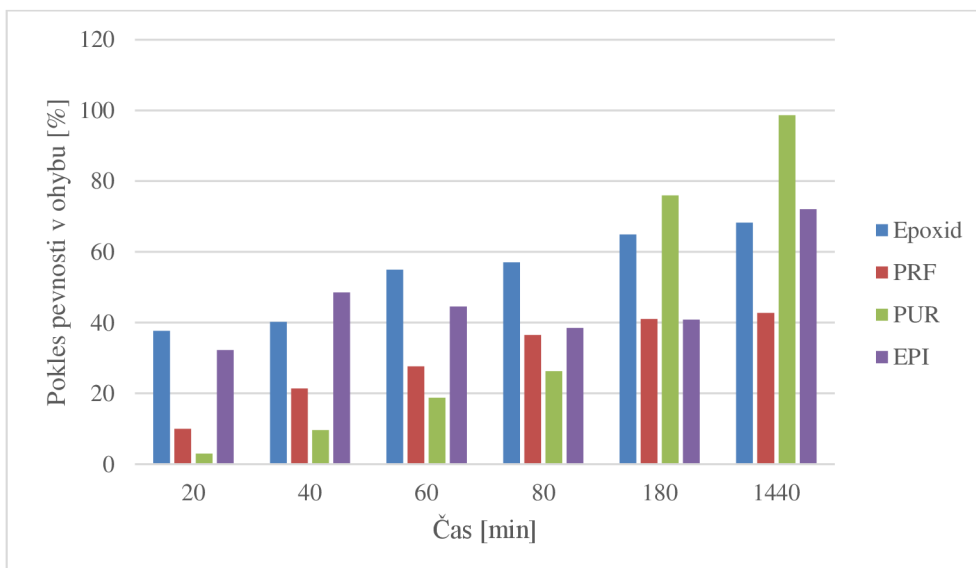
9.3. Časová závislost pevnosti plátového spoje při teplotní zátěži 170 °C

Pro zjištění vlivu časové závislosti na pevnost lepeného spoje bylo použito výsledků dosažených z ohybové zkoušky při podmínkách 170°C. Na následujícím obr. č. 26 je znázorněn vliv časové závislosti a na obr. č. 27 procentuální vývoj pevnosti v ohybu pro danou teplotní expozici.



Obr. č. 26: Porovnání vývoje pevností v ohybu jednotlivých druhů lepidel v čase pro danou teplotní expozici 170°C

Ohledně vlivu časové závislosti na pevnost v ohybu plátového spoje při jeho vystavení teplotě 170°C je z výsledků zřejmé, že při teplotním namáhání došlo opět k jejímu postupnému poklesu. Ten byl zaznamenán u všech druhů lepidel včetně epoxidového. U EPI lepidla však můžeme pozorovat drobné výkyvy pevností v časovém horizontu od 20 do 80 minut. Nejvyšší konečné hodnoty pevnosti v ohybu dosáhlo PRF lepidlo s dosaženou hodnotou 4,02 N/mm², naopak nejnižší PUR, které se v podstatě dostalo až na nulovou hodnotu (0,13 N/mm²).

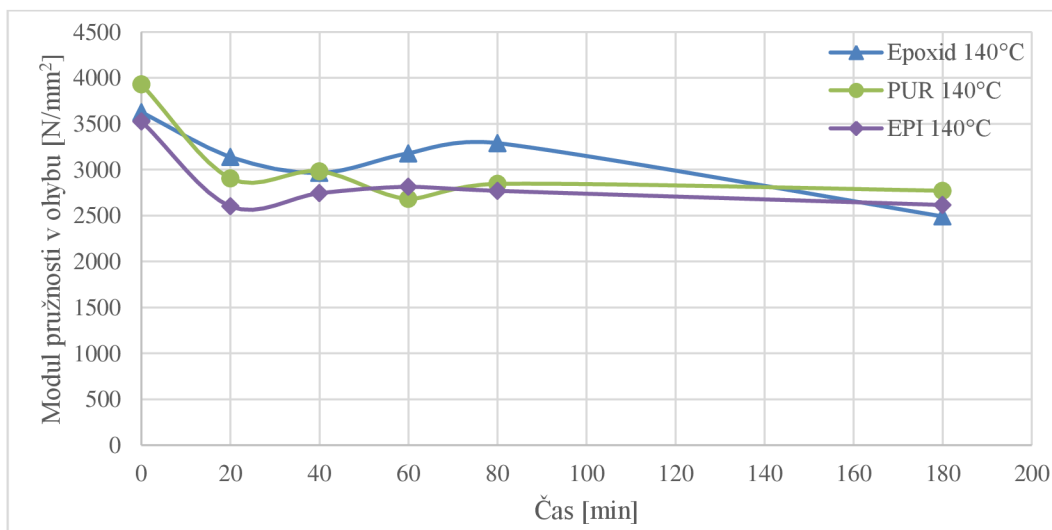


Obr. č. 27: Procentuální úbytek pevnosti v ohybu v závislosti na době působení teplotní expozice 170°C

Procentuální úbytek pevnosti v ohybu lepeného spoje vlivem působení teplotního namáhání 170°C po 24 hod (1440 min) výdrži dané teploty naznačuje přibližnou lineární závislost u PRF lepidla do doby 80 min, ale u zbývajících adheziv tato závislost již tak zřejmá není. PUR lepidlo má až exponenciální pokles pevnosti a vykazuje proto největší procentuální úbytek pevnosti v ohybu a to 98,6 %. U epoxidového (68,3 %) a EPI (72,0 %) je procentuální ztráta pevnosti v ohybu téměř srovnatelná. U FRP lepidla lze konstatovat, že v časovém intervalu od 80 do 1440 min téměř nedošlo k výraznějším změnám. Z časového hlediska je markantní, že po uplynutí doby 180min nedochází u lepidel (PRF, Epoxid) k významným poklesům pevnosti, naopak výrazná klesající tendence poklesu pevností po této době bylo zaznamenáno u izokyanátových lepidel.

9.4. Vliv druhu lepidla na modul pružnosti plátového spoje při teplotě 140 °C

Pro vliv druhu lepidla na pevnost lepeného spoje bylo použito výsledků dosažených z ohybové zkoušky při podmínkách 140°C. Na následujícím obr. č. 27 je znázorněn trend dosažených hodnot modulu pružnosti v ohybu v čase pro danou teplotní expozici.

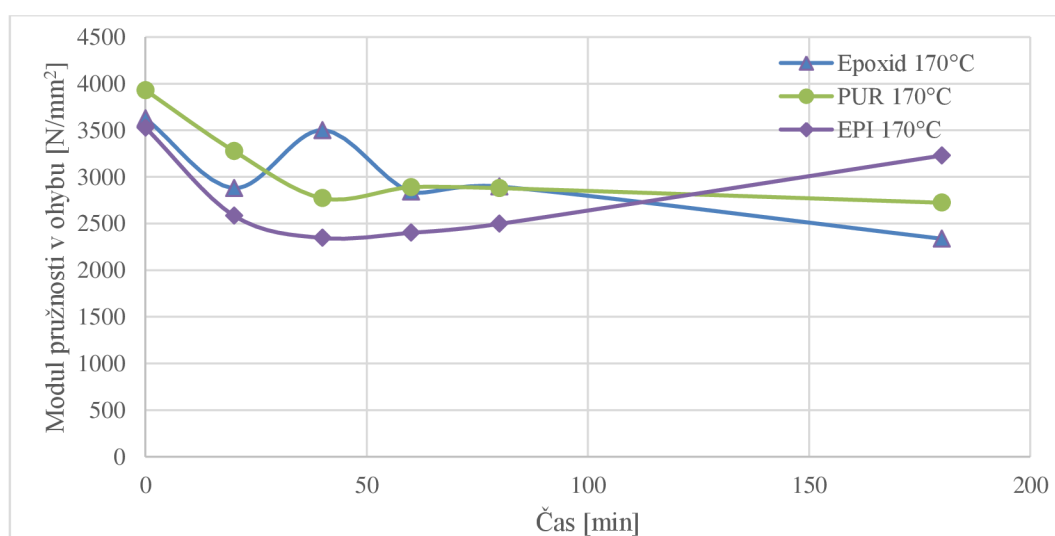


Obr. č. 28: Porovnání vývoje modulu pružnosti v ohybu jednotlivých druhů lepidel v čase pro danou teplotní expozici 140°C

Závislost druhu lepidla na modulu pružnosti plátového spoje při namáhání teplotou 140°C naznačuje, že vlivem působení zvýšené teploty došlo k mírnému poklesu, ke kterému dochází markantně po 20 minutách. Poté již tento parametr dosahoval neměnných, přibližně stejných, hodnot.

9.5. Vliv druhu lepidla na modul pružnosti plátového spoje při teplotě 170 °C

Pro vliv druhu lepidla na pevnost lepeného spoje bylo použito výsledků dosažených z ohybové zkoušky při podmínkách 170°C. Na následujícím obr. č. 29 je znázorněn vývoj modulu pružnosti v ohybu v čase pro danou teplotní expozici.

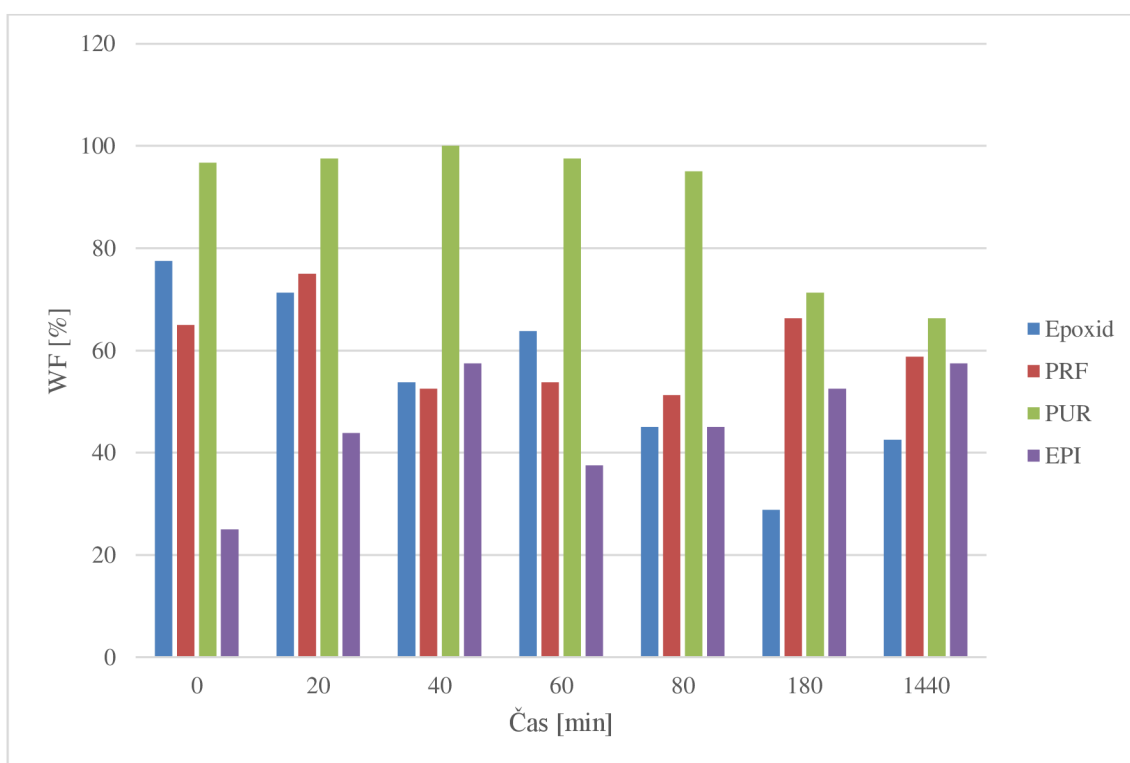


Obr. č. 29: Porovnání vývoje modulu pružnosti v ohybu jednotlivých druhů lepidel v čase pro danou teplotní expozici 170°C

Po vystavení plátového spoje teplotě 170°C se modul pružnosti pohyboval s větším rozptylem hodnot a je otázkou, zda tyto hodnoty jsou zcela relevantní. Nicméně z hlediska absolutních hodnot nedošlo při vyšší teplotní expozici k vyšším poklesům průměrných hodnot modulu pružnosti.

9.6. Kohezní poškození plátového spoje (WF wood failure) při jeho vystavení teplotnímu namáhání 140°C

Pro vliv kohezního poškození plátového spoje bylo použito výsledků ze stanovení zkoušky kohezního poškození při podmínkách 140°C. Na následujícím obr. č. 30 je zobrazen vývoj kohezního poškození plátového spoje při jeho postupném vystavení danému teplotnímu namáhání.



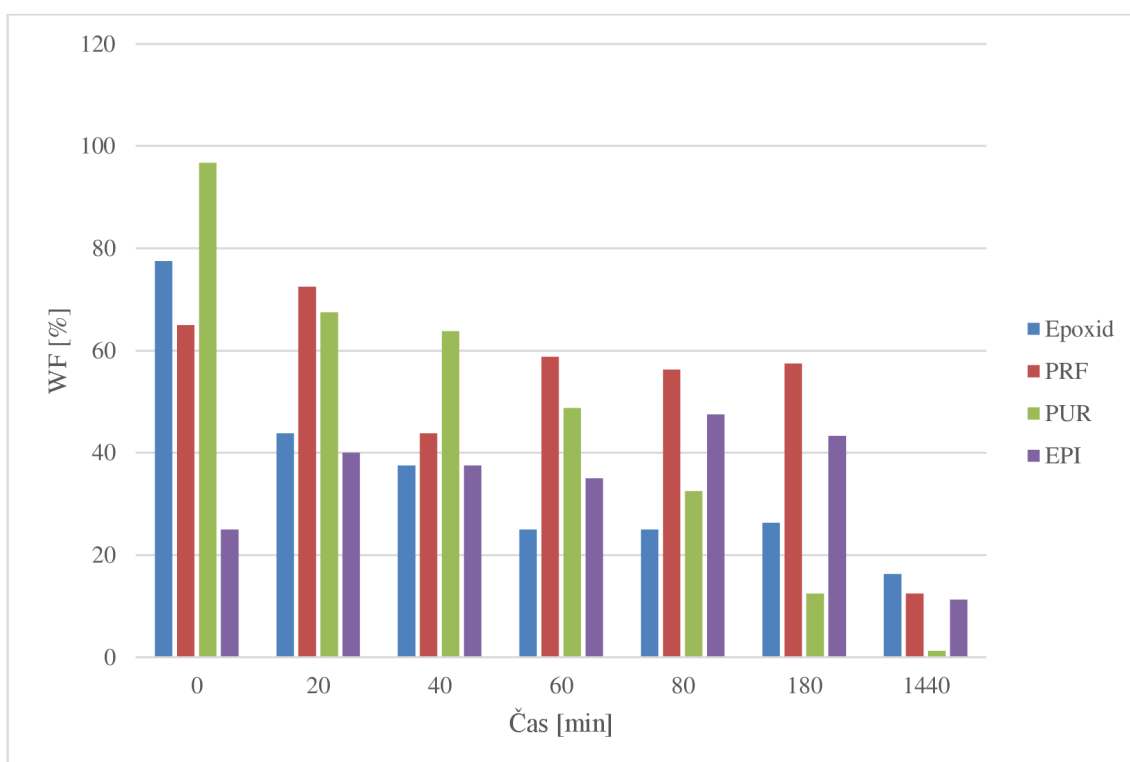
Obr. č. 30: Porovnání vývoje kohezního poškození plátového spoje pro jednotlivé druhy lepidel v čase u teplotní expozice 140°C

U kohezního poškození plátového spoje vlivem působení teploty 140°C nám výsledky ukazují různou míru soudržnosti adhezivum-dřevěný adherend pro dané typy lepidel. Nejvyšších hodnot kohezního poškození bylo dosaženo u spoje lepeného PUR lepidlem, které dosahovalo v časovém intervalu od 20 do 80 minut téměř 100% míry soudržnosti v lepené spáře (docházelo zde výhradně k poškození ve dřevní hmotě). U epoxidového lepidla vidíme

klesající tendenci soudržnosti, kde po 180 min expozici klesla (oproti nejvyšší hodnotě při 20°C) o 62,8 %. Nicméně je nutné zmínit, že pouze PUR lepidlo dosáhlo kritérium kohezního poškození 80%, u spojů při použití ostatních typů lepidel bylo dosaženo nižších hodnot svědčících o převažujícím adhezním poškození. Tento vliv je zejména patrný u EPI lepidla, které při 20°C vykazovalo hodnotu kohezního poškození pouze 25%. Nicméně zvyšující se teplota měla za následek, že po celou dobu teplotního zatěžování u EPI lepidla míra kohezního poškození dosahovala přibližně stejných hodnot 45 %. Relativně konstantních hodnot bylo dosaženo u PRF lepidla, kde je patrná stejná hodnota kohezního poškození pohybující se o velikosti 60 %.

9.7. Kohezní poškození plátového spoje (WF wood failure) při jeho vystavení teplotnímu namáhání 170°C

Pro vliv kohezního poškození plátového spoje bylo použito výsledků ze stanovení zkoušky kohezního poškození při podmínkách 170°C. Na následujícím obr. č. 31 je zobrazen vývoj kohezního poškození plátového spoje při jeho postupném vystavení danému teplotnímu namáhání.

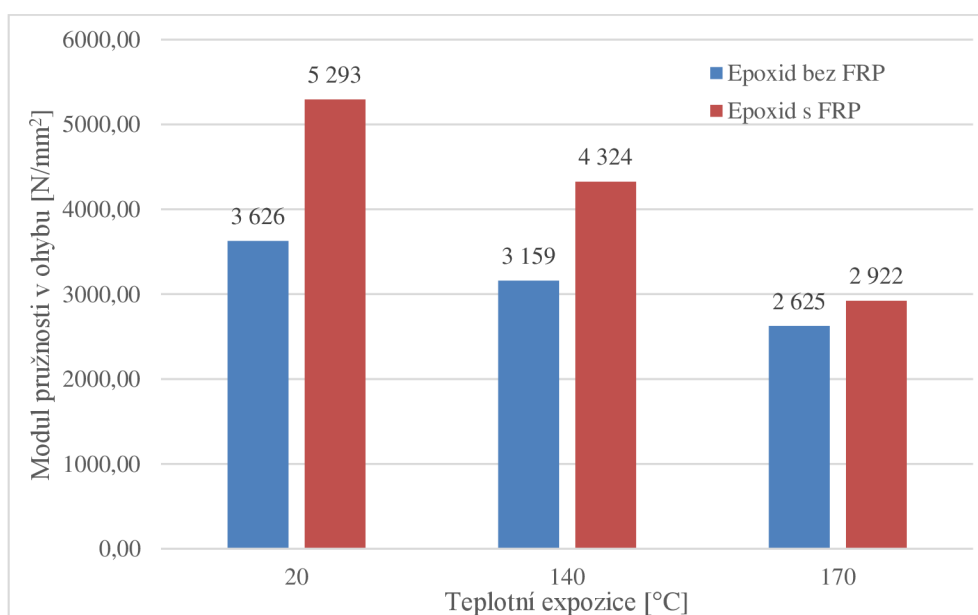


Obr. č. 31: Porovnání vývoje kohezního poškození plátového spoje pro jednotlivé druhy lepidel v čase u teplotní expozice 170°C

U kohezního poškození plátového spoje vlivem působení teploty 170°C vykazovala všechna lepidla po 24 hod teplotním namáhání pokles soudržnosti v lepené spáře. Tento vliv byl nejvíce markantní u polyuretanového lepidla, kde hodnota kohezního poškození klesla o 98,7 % (vzhledem k hodnotě při teplotě 20°C). U epoxidového a PRF lepidla klesla soudržnost v lepené spáře o srovnatelných 79,0 a 80,8 % (oproti 20°C). Ani jedno z lepidel nedosáhlo na kritérium kohezního poškození, které je 80 %. U PRF a EPI lze však vidět do doby 180 min oproti zbývajícím lepidlům celkem stabilní míru kohezního poškození v lepené spáře.

9.8. Vliv vyztužení plátového spoje FRP tkaninou u epoxidového lepidla

Pro zjištění vlivu vyztužení FRP tkaninou plátového spoje u epoxidového lepidla bylo použito výsledků dosažených z ohybové zkoušky při podmínkách 140° a 170°C po vystavení plátového spoje 24 hod teplotní expozici. Na následujícím obr. č. 32 je znázorněn vývoj modulu pružnosti v ohybu pro dané teplotní expozice.



Obr. č. 32: Vliv vyztužení FRP tkaninou na modul pružnosti v ohybu u plátového spoje lepeného epoxidovým lepidlem pro dané teplotní expozice

Z výsledků je patrné, že vyztužení FRP tkaninou mělo u tohoto lepidla určitý pozitivní dopad na hodnoty modulů pružnosti a tudíž na tuhost plátového spoje. Pro teplotu 20°C se jedná o nárůst 31,5 %, pro 140°C činí tento nárůst 27,0 % a pro teplotu 170°C pak nárůst 10,1 %. Tyto hodnoty jsou vzaty po čase 24 hod pro každou z teplotních expozic.

10. Závěr

Problematika odolnosti lepených prvků vůči zvýšeným teplotám se vzhledem k navyšujícímu počtu lepených prvků ve výstavbě jeví jako vysoce aktuální. Existují způsoby, jak navrhovat dřevěné prvky na účinky požáru. Nicméně podstata chování lepeného spoje (zubovitý spoj, plátový spoj atd.) při působení zvýšené teploty není zcela objasněna. Případná termická degradace lepidla ve spoji může vyústit v poměrně výrazné snížení únosnosti a tento spoj pak vlivem termické degradace adheziva může způsobit i snížení požární odolnosti celého dřevěného prvku.

V rámci experimentální části práce bylo provedeno zjištění odolnosti lepené spáry pro vybraný typ spoje, konkrétně pro plátový spoj při jeho expozici zvýšeným teplotám. Tento vliv byl odzkoušen pro čtyři typy komerčně používaných lepidel (epoxidové, fenol-rezorcín formaldehydové, polyuretanové a EPI). V konečném důsledku u všech těchto adheziv dle předpokladu došlo vlivem působení tepelného namáhání k postupnému snížení jejich mechanických parametrů. **Při expozici 140°C** činil pokles pevností v ohybu po 24 hod expozici u všech lepidel kromě epoxidu cca 40 %, nejvyšších poklesů bylo zaznamenáno pro PRF a PUR lepidlo. Jediné PUR lepidlo vykazovalo i po době 180 min poklesů pevnosti, ostatní lepidla již po této době nevykazovala pokles. Naopak z hlediska kohezního poškození, které nám udává charakteristiku porušení spoje v lepené spáře, PUR lepidlo do 180 min vykazovalo nejvyšších hodnot kohezního poškození svědčící o řádné pevnosti spoje. Nejkonstantnějších hodnot kohezního poškození bylo pro všechny časové expozice dosaženo pro PRF lepidlo. **Při expozici 170°C** byl pokles pevností v ohybu po 24 hod expozici nejvíce patrný u polyuretanového lepidla (98,2 %) a srovnatelný u epoxidového a EPI lepidla (cca 70 %). Nejnižších poklesů bylo dosaženo u fenol-rezorcín formaldehydového lepidla (43,4 %). Faktem je, že lepidla na izokyanátové bázi vykazovaly sestupný trend poklesů pevnosti v průběhu celé časové expozice oproti epoxidovému a fenol-rezorcín formaldehydovému adhezivu, které po 180 min již nevykazovaly pokles pevnosti lepeného spoje. U kohezního poškození po 24 hod vystavení dané teplotě došlo u všech lepidel k poklesu hodnot soudržnosti v lepené spáře. Docházelo především k adheznímu porušení v lepeném spoji U fenol-rezorcín formaldehydového a EPI lepidla lze však pozorovat vcelku stabilní míru kohezního poškození do doby přibližně 180 min.

Závěrem dle mého uvážení lze vyvodit ten závěr, že byla prokázána vyšší teplotní odolnost lepidel na formaldehydové bázi (fenol-rezorcín formaldehyd) oproti izokyanátům (PUR, EPI), kde zejména u polyuretanového adheziva došlo prakticky k úplnému selhání pevnosti a

soudržnosti spoje při jeho vystavení teplotě 170°C po 24 hod. expozici. Naopak výsledky fenol-rezorcín formaldehydové lepidla, které i po 24 hod vystavení 170°C vykazovalo téměř nezměněných hodnot pevností v ohybu a konstantních hodnot kohezního poškození spoje, lze vyhodnotit z výběru testovaných lepidel za lepidlo s nejvyšší teplotní odolností.

11. LITERATURA

- [1] DIETRICH FENGEL, Gerd Wegener. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Reprint der Originalausgabe (ehem. de Gruyter). München: Kessel, 2003. ISBN 3935638396.
- [2] KAČÍKOVÁ, Danica, Miroslava NETOPILOVÁ a Anton OSVALD. *Drevo a jeho termická degradácia*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2006. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 80-86634-78-7.
- [3] [Http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:46860/eth-46860-01.pdf](http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:46860/eth-46860-01.pdf) [online]. [cit. 2016-09-25].
- [4] [Https://cs.wikipedia.org/wiki/Celul%C3%B3za](https://cs.wikipedia.org/wiki/Celul%C3%B3za) [online]. [cit. 2016-09-25].
- [5] ČUNDERLÍK, Igor. *Štruktúra dreva* [online]. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009 [cit. 2016-09-29]. ISBN 978-80-228-2061-5.
- [6] POŽGAJ, A, CHOVANEC, D, KURJATKO, S a BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-07-00960-4.
- [7] [Http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=1662&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=1662&typ=html) [online]. [cit. 2016-10-02].
- [9] [Http://fast10.vsb.cz/odk/prednasdk/ODPK_AL_07.pdf](http://fast10.vsb.cz/odk/prednasdk/ODPK_AL_07.pdf) [online]. [cit. 2016-10-11].
- [9] Balabán K.: *Nauka o dřevě, 1. část, Anatomie dřeva*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 1955.
- [10] [Http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf) [online]. [cit. 2016-10-11].
- [11] [Http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_makroskopicka_stavba_dreva/](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_makroskopicka_stavba_dreva/) [online]. [cit. 2016-10-11].
- [12] [Http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1367](http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1367) [online]. [cit. 2016-10-14].
- [14] [Http://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/8879-hodnoty-pozarni-odolnosti-konstrukci-bez-uvazovani-namahani](http://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/8879-hodnoty-pozarni-odolnosti-konstrukci-bez-uvazovani-namahani) [online]. [cit. 2016-10-18].
- [15] KOLEKTIV AUTORŮ. *Dřevostavby*. Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola. Volyně, 2006. ISBN 80-86837-03-3.

- [16] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. Polytechnická knižnice (SNTL).
- [17] [Http://www.betosan.cz/wp-content/uploads/tyfo_sch_7up_TL.pdf](http://www.betosan.cz/wp-content/uploads/tyfo_sch_7up_TL.pdf) [online]. [cit. 2017-01-02].
- [18] [Http://www.drevostavitel.cz/clanek/mechanicke-vlastnosti-dreva-domacich-drevin](http://www.drevostavitel.cz/clanek/mechanicke-vlastnosti-dreva-domacich-drevin) [online]. [cit. 2017-01-07].
- [19] www.axson.cz/download.php?documentID=31&fileID=51&languageID=1 [online]. [cit. 2017-01-07].
- [20] [Http://www.gluesdirect.co.uk/catalog/product_info.php?products_id=1138](http://www.gluesdirect.co.uk/catalog/product_info.php?products_id=1138) [online]. [cit. 2017-01-07].
- [21] [Http://www.lepidla-eshop.cz/static/_dokumenty/3/2/1/Kestopur-1030.pdf](http://www.lepidla-eshop.cz/static/_dokumenty/3/2/1/Kestopur-1030.pdf) [online]. [cit. 2017-01-07].
- [22] [Http://en.kiilto.com/attachments/1/2/white_papers/Kestokol%20WR%20125%20EPI-adhesive.pdf](http://en.kiilto.com/attachments/1/2/white_papers/Kestokol%20WR%20125%20EPI-adhesive.pdf) [online]. [cit. 2017-01-07].
- [23] Nuopponen, M., Vuorinen, T., Jämsä, S., & Viitaniemi, P. (2003). *The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods*. Wood Science and Technology, 37, 2003.
- [24] Back, E.L. 2000. *The location and morphology of resin components in the wood*. In: Back, E.L. –Allen, L.A. (eds.): Pitch kontrol, wood resin and deresination. Atlanta: Tappi, 2000.
- [25] [Http://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/8853-tepelna-a-mechanicka-zatizeni-konstrukci-pri-pozaru](http://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/8853-tepelna-a-mechanicka-zatizeni-konstrukci-pri-pozaru) [online]. [cit. 2017-01-08].
- [26] ČSN ISO 10365, *Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*, Praha: Český normalizační institut, 1995.
- [27] KUKLÍK, P. *Dřevěné konstrukce*. 1.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT 188 s. ISBN 80-01-03310-4.
- [28] *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5*. Přeložil Bohumil KOŽELOUH. Zlín: KODR, c1998. ISBN 80-238-2620-4.
- [29] [Http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/Kurz_2005/06_Drevene_konstrukce.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/Kurz_2005/06_Drevene_konstrukce.pdf) [online]. [cit. 2017-01-10].

12. Seznam zkratek

PRF	fenol-rezorcín formaldehyd
PUR	polyuretan
EPI	emulsion – polymere - isocyanate
WF	(wood failure) kohezní porušení
PMMA	polymethylmethakrylát
PVC	polyvinylchlorid
PP	polypropylen

13. Přílohy

13.1. Tabulky dosažených a naměřených hodnot pro epoxidové lepidlo

Tab. č. 27. Teplota 20°C v čase 0 (bez vyztužení)

	Teplota 20 °C v čase 0 min (bez vyztužení)					
Ozn. vzorku	A1	B1	C1	D1	E1	F1
F_{max} [kN]	1,73	1,44	1,38	1,72	1,62	1,25
f_m [N/mm ²]	8,45	7,03	6,74	8,40	7,91	6,10
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3746,14	3617,58	4000,02	3032,14	3718,04	3641,07
WF [%]	75	45	100	80	90	75
$\bar{x} f_m$	7,44					
$\bar{x} E_{m,g}$	3626					
$\bar{x} WF$	77,5					

Tab. č. 28. Teplota 20°C v čase 0 (s vyztužením)

	Teplota 20 °C v čase 0 min (s vyztužením)					
Ozn. vzorku	A1	B1	C1	D1	E1	F1
F_{max} [kN]	1,65	1,29	1,79	2,01	1,58	1,43
f_m [N/mm ²]	8,06	6,30	8,74	9,81	7,71	6,98
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	4945,04	3254,75	5366,42	5926,43	6463,86	5802,08
$\bar{x} f_m$	7,93					
$\bar{x} E_{m,g}$	5293					

Tab. č. 29. Teplota 140°C v čase 20 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 20 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,23	1,23	1,22	1,17
f_m [N/mm ²]	6,02	6,02	5,96	5,71
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3225,37	3807,88	2763,99	2760,73
WF [%]	65	85	80	55
$\bar{x} f_m$	5,95			
$\bar{x} E_{m,g}$	3140			
\bar{x} WF	71,3			

Tab. č. 30. Teplota 140°C v čase 40 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 40 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	1,17	1,11	1,19	1,05
f_m [N/mm ²]	5,71	5,44	5,81	5,14
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3605,60	3016,49	2957,32	2280,89
WF [%]	60	55	55	45
$\bar{x} f_m$	5,53			
$\bar{x} E_{m,g}$	2965			
\bar{x} WF	53,8			

Tab. č. 31. Teplota 140°C v čase 60 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 60 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	1,21	0,92	0,99	1,00
f_m [N/mm ²]	5,91	4,48	4,81	4,89
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3230,89	2433,07	3703,29	3349,91
WF [%]	80	75	55	45
$\bar{x} f_m$	5,02			
$\bar{x} E_{m,g}$	3179			
\bar{x} WF	63,8			

Tab. č. 32. Teplota 140°C v čase 80 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 80 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	0,80	0,79	1,07	0,86
f_m [N/mm ²]	3,91	3,86	5,22	4,20
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2397,60	3526,50	3157,80	4076,23
WF [%]	70	20	55	35
$\bar{x} f_m$	4,30			
$\bar{x} E_{m,g}$	3290			
\bar{x} WF	45,0			

Tab. č. 33. Teplota 140°C v čase 180 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	0,81	0,91	0,82	0,79
f_m [N/mm ²]	3,96	4,45	4,02	3,86
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2167,55	2839,33	2518,91	2439,58
WF [%]	20	25	45	25
$\bar{x} f_m$	4,07			
$\bar{x} E_{m,g}$	2491			
\bar{x} WF	28,8			

Tab. č. 34. Teplota 140°C v čase 1440 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 1440 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	0,79	1,22	1,38	1,24
f_m [N/mm ²]	3,86	5,97	6,75	6,06
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3238,85	3237,61	2975,29	3182,57
WF [%]	40	35	40	55
$\bar{x} f_m$	5,66			
$\bar{x} E_{m,g}$	3159			
\bar{x} WF	42,5			

Tab. č. 35. Teplota 170°C v čase 20 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 20 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,16	0,79	1,06	0,80
f_m [N/mm ²]	5,64	3,86	5,15	3,90
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2863,56	3075,14	2982,24	2598,04
WF [%]	30	70	35	40
$\bar{x} f_m$	4,64			
$\bar{x} E_{m,g}$	2880			
\bar{x} WF	43,8			

Tab. č. 36. Teplota 170°C v čase 40 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 40 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	1,20	0,84	0,91	0,70
f_m [N/mm ²]	5,85	4,09	4,44	3,42
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	4986,28	2809,34	3259,96	2947,77
WF [%]	25	65	35	25
$\bar{x} f_m$	4,45			
$\bar{x} E_{m,g}$	3501			
\bar{x} WF	37,5			

Tab. č. 37. Teplota 170°C v čase 60 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 60 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	0,70	0,70	0,70	0,64
f_m [N/mm ²]	3,44	3,40	3,42	3,13
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2569,50	3137,81	3214,15	2434,46
WF [%]	20	30	30	20
$\bar{x} f_m$	3,35			
$\bar{x} E_{m,g}$	2839			
\bar{x} WF	25,0			

Tab. č. 38. Teplota 170°C v čase 80 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 80 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	0,70	0,65	0,62	0,65
f_m [N/mm ²]	3,42	3,17	3,03	3,17
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2947,77	3031,52	3316,56	2291,49
WF [%]	25	25	20	30
$\bar{x} f_m$	3,20			
$\bar{x} E_{m,g}$	2897			
\bar{x} WF	25,0			

Tab. č. 39. Teplota 170°C v čase 180 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	0,50	0,59	0,52	0,53
f_m [N/mm ²]	2,42	2,88	2,54	2,59
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	1813,86	2421,89	2552,82	2559,66
WF [%]	55	20	15	15
$\bar{x} f_m$	2,61			
$\bar{x} E_{m,g}$	2337			
\bar{x} WF	26,3			

Tab. č. 40. Teplota 170°C v čase 1440 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 1440 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	0,48	0,50	0,47	0,49
f_m [N/mm ²]	2,34	2,44	2,29	2,38
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	1967,17	2929,28	3170,26	2431,49
WF [%]	5	25	20	15
$\bar{x} f_m$	2,36			
$\bar{x} E_{m,g}$	2625			
\bar{x} WF	16,3			

Tab. č. 41. Teplota 140°C v čase 20 min (s vyztužením)

Teplota 140 °C v čase 20 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,00	1,02	1,38	1,44
f_m [N/mm ²]	4,87	4,99	6,76	7,03
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2925,88	2812,46	3505,55	3913,58
$\bar{x} f_m$	5,91			
$\bar{x} E_{m,g}$	3289			

Tab. č. 42. Teplota 140°C v čase 40 min (s vyztužením)

Teplota 140 °C v čase 40 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	1,31	1,03	1,32	1,08
f_m [N/mm ²]	6,42	5,04	6,46	5,27
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	4082,09	4205,24	3708,41	3833,23
$\bar{x} f_m$	5,80			
$\bar{x} E_{m,g}$	3957			

Tab. č. 43. Teplota 140°C v čase 60 min (s vyztužením)

Teplota 140 °C v čase 60 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	1,01	1,23	0,97	1,07
f_m [N/mm ²]	4,94	6,02	4,72	5,22
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2672,71	2808,69	2883,73	3505,43
$\bar{x} f_m$	5,23			
$\bar{x} E_{m,g}$	2968			

Tab. č. 44. Teplota 140°C v čase 80 min (s vyztužením)

Teplota 140 °C v čase 80 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	1,26	1,13	0,99	0,80
f_m [N/mm ²]	6,17	5,53	4,86	3,92
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	4127,75	2855,91	3386,32	3104,61
$\bar{x} f_m$	5,12			
$\bar{x} E_{m,g}$	3387			

Tab. č. 45. Teplota 140°C v čase 180 min (s vyztužením)

Teplota 140 °C v čase 180 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	1,03	0,80	0,89	1,18
f_m [N/mm ²]	5,02	3,91	4,35	5,77
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2980,86	2562,56	3927,44	4159,81
$\bar{x} f_m$	4,76			
$\bar{x} E_{m,g}$	3408			

Tab. č. 46. Teplota 140°C v čase 1440 min (s vyztužením)

Teplota 140 °C v čase 1440 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	1,19	1,35	0,84	1,12
f_m [N/mm ²]	5,83	6,58	4,10	5,46
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	6047,92	5010,56	2939,86	3297,79
$\bar{x} f_m$	5,49			
$\bar{x} E_{m,g}$	4324			

Tab. č. 47. Teplota 170°C v čase 20 min (s vyztužením)

Teplota 170 °C v čase 20 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,41	1,30	1,22	1,02
f_m [N/mm ²]	6,88	6,35	5,96	4,98
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3062,43	3143,54	4403,78	4011,99
$\bar{x} f_m$	6,04			
$\bar{x} E_{m,g}$	3655			

Tab. č. 48. Teplota 170°C v čase 40 min (s vyztužením)

Teplota 170 °C v čase 40 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	1,00	1,17	1,19	1,05
f_m [N/mm ²]	4,88	5,71	5,81	5,13
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2369,70	2584,06	3115,32	3425,15
$\bar{x} f_m$	5,38			
$\bar{x} E_{m,g}$	2874			

Tab. č. 49. Teplota 170°C v čase 60 min (s vyztužením)

Teplota 170 °C v čase 60 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	0,95	0,80	0,64	0,70
f_m [N/mm ²]	4,64	3,91	3,13	3,42
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2942,81	2161,74	2084,59	2564,83
$\bar{x} f_m$	3,78			
$\bar{x} E_{m,g}$	2439			

Tab. č. 50. Teplota 170°C v čase 80 min (s vyztužením)

Teplota 170 °C v čase 80 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	0,60	0,52	0,67	0,61
f_m [N/mm ²]	2,93	2,53	3,27	2,97
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2994,36	2587,38	2558,99	2278,17
$\bar{x} f_m$	2,93			
$\bar{x} E_{m,g}$	2730			

Tab. č. 51. Teplota 170°C v čase 180 min (s vyztužením)

Teplota 170 °C v čase 180 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	0,88	0,96	1,10	1,13
f_m [N/mm ²]	4,30	4,67	5,39	5,51
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2583,47	3926,91	3733,19	3818,22
$\bar{x} f_m$	4,97			
$\bar{x} E_{m,g}$	3515,45			

Tab. č. 52. Teplota 170°C v čase 1440 min (s vyztužením)

Teplota 170 °C v čase 1440 min (s vyztužením)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	0,67	0,65	0,65	0,60
f_m [N/mm ²]	3,27	3,17	3,16	2,93
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3591,43	2786,02	2547,60	2761,57
$\bar{x} f_m$	3,13			
$\bar{x} E_{m,g}$	2922			

13.2. Tabulky dosažených a naměřených hodnot pro fenol-rezorcín formaldehydové lepidlo

Tab. č. 53. Teplota 20°C v čase 0 min (bez vyztužení)

	Teplota 20 °C v čase 0 (bez vyztužení)					
Ozn. vzorku	A1	B1	C1	D1	E1	F1
F_{\max} [kN]	1,26	1,31	1,64	1,14	1,34	1,94
f_m [N/mm ²]	6,15	6,40	8,01	5,57	6,54	9,47
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-	-	-
WF [%]	55	95	80	45	50	65
$\bar{x} f_m$	7,02					
$\bar{x} E_{m,g}$	-					
$\bar{x} WF$	65,0					

Tab. č. 54. Teplota 140°C v čase 20 min (bez vyztužení)

	Teplota 140 °C v čase 20 min (bez vyztužení)			
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,26	1,41	1,34	1,13
f_m [N/mm ²]	6,15	6,88	6,54	5,52
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	75	70	80	75
$\bar{x} f_m$	6,27			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	75,0			

Tab. č. 55. Teplota 140°C v čase 40 min (bez vyztužení)

	Teplota 140 °C v čase 40 min (bez vyztužení)			
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	0,97	1,21	1,05	1,09
f_m [N/mm ²]	4,74	5,91	5,13	5,32
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	20	25	85	80
$\bar{x} f_m$	5,28			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	52,5			

Tab. č. 56. Teplota 140°C v čase 60 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 60 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	1,05	1,08	0,86	0,84
f_m [N/mm ²]	5,13	5,27	4,20	4,10
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	60	45	55	55
$\bar{x} f_m$	4,68			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	53,8			

Tab. č. 57. Teplota 140°C v čase 80 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 80 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	1,21	0,96	0,87	0,68
f_m [N/mm ²]	5,91	4,69	4,25	3,32
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	5	15	90	95
$\bar{x} f_m$	4,54			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	51,3			

Tab. č. 58. Teplota 140°C v čase 180 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	1,09	0,84	0,78	0,76
f_m [N/mm ²]	5,32	4,10	3,81	3,71
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	35	35	95	100
$\bar{x} f_m$	4,24			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	66,3			

Tab. č. 59. Teplota 140°C v čase 1440 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 1440 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	0,69	0,61	0,86	0,86
f_m [N/mm ²]	3,37	2,98	4,20	4,20
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	20	75	75	65
$\bar{x} f_m$	3,69			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	58,8			

Tab. č. 60. Teplota 170°C v čase 20 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 20 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,33	1,26	1,30	1,29
f_m [N/mm ²]	6,49	6,15	6,35	6,30
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	75	60	60	95
$\bar{x} f_m$	6,32			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	72,5			

Tab. č. 61. Teplota 170°C v čase 40 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 40 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	1,09	1,11	1,09	1,23
f_m [N/mm ²]	5,32	5,42	5,32	6,01
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	25	15	80	55
$\bar{x} f_m$	5,52			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	43,8			

Tab. č. 62. Teplota 170°C v čase 60 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 60 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	1,06	0,99	1,03	1,08
f_m [N/mm ²]	5,18	4,83	5,03	5,27
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	95	10	45	85
$\bar{x} f_m$	5,08			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	58,8			

Tab. č. 63. Teplota 170°C v čase 80 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 80 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	0,91	0,90	0,93	0,91
f_m [N/mm ²]	4,44	4,40	4,54	4,44
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	65	70	15	75
$\bar{x} f_m$	4,46			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	56,3			

Tab. č. 64. Teplota 170°C v čase 180 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	0,85	0,84	0,89	0,81
f_m [N/mm ²]	4,15	4,10	4,35	3,96
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	75	25	95	35
$\bar{x} f_m$	4,14			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	57,5			

Tab. č. 65. Teplota 170°C v čase 1440 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 1440 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	0,77	0,64	0,78	1,06
f_m [N/mm ²]	3,76	3,31	3,81	5,18
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	-	-	-	-
WF [%]	5	10	10	25
$\bar{x} f_m$	4,02			
$\bar{x} E_{m,g}$	-			
$\bar{x} WF$	12,5			

13.3. Tabulky dosažených a naměřených hodnot pro polyuretanové lepidlo

Tab. č. 66. Teplota 20°C v čase 0 min (bez vyztužení)

Teplota 20 °C v čase 0 (bez vyztužení)						
Ozn. vzorku	A1	B1	C1	D1	E1	F1
F_{\max} [kN]	2,36	1,72	1,94	2,03	1,82	1,45
f_m [N/mm ²]	11,54	8,39	9,48	9,91	8,89	7,06
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	6275,19	3836,05	3148,35	4541,73	3705,17	2064,28
WF [%]	100	100	90	100	100	90
$\bar{x} f_m$	9,21					
$\bar{x} E_{m,g}$	3929					
$\bar{x} WF$	96,7					

Tab. č. 67. Teplota 140°C v čase 20 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 20 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,52	1,39	2,17	2,11
f_m [N/mm ²]	7,41	6,80	10,58	10,28
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2274,26	2504,22	2920,99	3925,89
WF [%]	95	100	95	100
$\bar{x} f_m$	8,77			
$\bar{x} E_{m,g}$	2906			
$\bar{x} WF$	97,5			

Tab. č. 68. Teplota 140°C v čase 40 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 40 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	2,08	1,72	1,54	1,15
f_m [N/mm ²]	10,14	8,42	7,54	5,63
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3615,44	3318,89	2564,35	2432,69
WF [%]	100	100	100	100
$\bar{x} f_m$	7,93			
$\bar{x} E_{m,g}$	2983			
\bar{x} WF	100,0			

Tab. č. 69. Teplota 140°C v čase 60 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 60 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	1,76	1,54	1,49	1,42
f_m [N/mm ²]	8,59	7,51	7,28	6,93
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2502,10	2880,06	2793,52	2548,19
WF [%]	95	100	100	95
$\bar{x} f_m$	7,58			
$\bar{x} E_{m,g}$	2681			
\bar{x} WF	97,5			

Tab. č. 70. Teplota 140°C v čase 80 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 80 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	1,58	1,42	1,52	1,38
f_m [N/mm ²]	7,69	6,92	7,44	6,74
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2795,07	2395,59	3124,27	3070,41
WF [%]	95	90	95	100
$\bar{x} f_m$	7,20			
$\bar{x} E_{m,g}$	2846			
\bar{x} WF	95,0			

Tab. č. 71. Teplota 140°C v čase 180 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	1,79	1,34	1,30	1,32
f_m [N/mm ²]	8,75	6,56	6,37	6,44
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3007,71	2222,93	3222,83	2631,85
WF [%]	80	95	35	75
$\bar{x} f_m$	7,03			
$\bar{x} E_{m,g}$	2771			
$\bar{x} WF$	71,3			

Tab. č. 72. Teplota 140°C v čase 1440 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 1440 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	1,10	0,97	1,23	0,94
f_m [N/mm ²]	5,35	4,72	6,02	4,59
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3306,52	2442,45	3178,12	3276,93
WF [%]	65	50	65	85
$\bar{x} f_m$	5,17			
$\bar{x} E_{m,g}$	3051			
$\bar{x} WF$	66,3			

Tab. č. 73. Teplota 170°C v čase 20 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 20 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,56	2,10	2,13	1,53
f_m [N/mm ²]	7,62	10,25	10,40	7,47
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2986,90	3433,98	3756,19	2932,42
WF [%]	80	75	65	50
$\bar{x} f_m$	8,94			
$\bar{x} E_{m,g}$	3227			
$\bar{x} WF$	67,5			

Tab. č. 74. Teplota 170°C v čase 40 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 40 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	1,96	1,75	1,68	1,43
f_m [N/mm ²]	9,57	8,54	8,20	6,98
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3020,23	2592,85	2894,50	2575,56
WF [%]	80	75	55	45
$\bar{x} f_m$	8,32			
$\bar{x} E_{m,g}$	2771			
\bar{x} WF	63,8			

Tab. č. 75. Teplota 170°C v čase 60 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 60 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	1,52	1,94	1,35	1,32
f_m [N/mm ²]	7,42	9,47	6,59	6,44
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2939,94	3432,46	2400,16	2788,16
WF [%]	85	45	25	40
$\bar{x} f_m$	7,48			
$\bar{x} E_{m,g}$	2890			
\bar{x} WF	48,8			

Tab. č. 76. Teplota 170°C v čase 80 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 80 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	1,32	1,33	1,39	1,52
f_m [N/mm ²]	6,44	6,49	6,79	7,42
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3035,45	3039,38	2639,88	2801,77
WF [%]	45	25	5	55
$\bar{x} f_m$	6,79			
$\bar{x} E_{m,g}$	2879			
\bar{x} WF	32,5			

Tab. č. 77. Teplota 170°C v čase 180 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	0,49	0,41	0,45	0,46
f_m [N/mm ²]	2,39	2,02	2,22	2,23
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3205,61	2289,01	2739,47	2657,80
WF [%]	15	10	10	15
$\bar{x} f_m$	2,22			
$\bar{x} E_{m,g}$	2723			
\bar{x} WF	12,5			

Tab. č. 78. Teplota 170°C v čase 1440 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 1440 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	0,00	0,03	0,05	0,06
f_m [N/mm ²]	0,00	0,12	0,20	0,20
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	0,00	0,00	563,70	1892,66
WF [%]	0	5	0	0
$\bar{x} f_m$	0,13			
$\bar{x} E_{m,g}$	614			
\bar{x} WF	1,3			

13.4. Tabulky naměřených a dosažených hodnot pro EPI lepidlo

Tab. č. 79. Teplota 20°C v čase 0 min (bez vyztužení)

Teplota 20 °C v čase 0 (bez vyztužení)						
Ozn. vzorku	A1	B1	C1	D1	E1	F1
F_{\max} [kN]	1,69	1,74	1,55	1,31	1,73	1,71
f_m [N/mm ²]	8,27	8,48	7,57	6,42	8,45	8,37
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	4865,88	2748,64	3574,65	2880,04	3333,63	3758,06
WF [%]	25	35	30	25	25	10
$\bar{x} f_m$	7,93					
$\bar{x} E_{m,g}$	3527					
\bar{x} WF	25,0					

Tab. č. 80. Teplota 140°C v čase 20 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 20 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,39	1,36	1,42	1,49
f_m [N/mm ²]	6,81	6,64	6,92	7,25
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2729,33	2533,07	2470,94	2668,80
WF [%]	35	85	20	35
$\bar{x} f_m$	6,91			
$\bar{x} E_{m,g}$	2601			
\bar{x} WF	43,8			

Tab. č. 81. Teplota 140°C v čase 40 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 40 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	1,67	1,20	1,22	1,48
f_m [N/mm ²]	8,17	5,85	5,94	7,22
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	3710,49	2513,19	1908,17	2843,35
WF [%]	35	20	85	90
$\bar{x} f_m$	6,80			
$\bar{x} E_{m,g}$	2744			
\bar{x} WF	57,5			

Tab. č. 82. Teplota 140°C v čase 60 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 60 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	1,17	1,42	1,14	1,25
f_m [N/mm ²]	5,73	6,91	5,56	6,10
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2827,06	3214,84	2527,15	2686,07
WF [%]	65	55	10	20
$\bar{x} f_m$	6,08			
$\bar{x} E_{m,g}$	2814			
\bar{x} WF	37,5			

Tab. č. 83. Teplota 140°C v čase 80 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 80 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	0,97	1,07	1,14	1,06
f_m [N/mm ²]	4,74	5,23	5,54	5,19
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2665,3	3350,25	2367,75	2698,60
WF [%]	10	20	65	85
$\bar{x} f_m$	5,18			
$\bar{x} E_{m,g}$	2770			
\bar{x} WF	45,0			

Tab. č. 84. Teplota 140°C v čase 180 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	0,86	0,79	0,97	1,27
f_m [N/mm ²]	4,22	3,84	4,73	6,20
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2271,89	2364,01	2530,47	3298,69
WF [%]	15	10	95	90
$\bar{x} f_m$	4,75			
$\bar{x} E_{m,g}$	2616			
\bar{x} WF	52,5			

Tab. č. 85. Teplota 140°C v čase 1440 min (bez vyztužení)

Teplota 140 °C v čase 1440 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	0,60	1,20	1,14	1,05
f_m [N/mm ²]	2,93	5,88	5,54	5,15
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	0,00	4164,91	3877,95	3516,30
WF [%]	85	80	55	10
$\bar{x} f_m$	4,88			
$\bar{x} E_{m,g}$	2890			
\bar{x} WF	57,5			

Tab. č. 86. Teplota 170°C v čase 20 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 20 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A2	B2	C2	D2
F_{\max} [kN]	1,10	0,98	1,05	1,27
f_m [N/mm ²]	5,39	4,77	5,10	6,21
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2222,06	2224,94	2480,21	3409,28
WF [%]	5	20	75	60
$\bar{x} f_m$	5,37			
$\bar{x} E_{m,g}$	2584			
\bar{x} WF	40,0			

Tab. č. 87. Teplota 170°C v čase 40 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 40 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A3	B3	C3	D3
F_{\max} [kN]	0,75	0,64	0,95	0,99
f_m [N/mm ²]	3,67	3,12	4,65	4,86
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2226,45	2010,14	2660,31	2481,64
WF [%]	30	45	40	35
$\bar{x} f_m$	4,08			
$\bar{x} E_{m,g}$	2345			
\bar{x} WF	37,5			

Tab. č. 88. Teplota 170°C v čase 60 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 60 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A4	B4	C4	D4
F_{\max} [kN]	1,02	0,89	0,78	0,91
f_m [N/mm ²]	5,00	4,33	3,80	4,46
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2403,41	2138,32	2324,09	2732,13
WF [%]	35	20	45	40
$\bar{x} f_m$	4,40			
$\bar{x} E_{m,g}$	2400			
\bar{x} WF	35,0			

Tab. č. 89. Teplota 170°C v čase 80 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 80 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A5	B5	C5	D5
F_{\max} [kN]	1,09	1,06	1,02	0,81
f_m [N/mm ²]	5,35	5,20	5,00	3,97
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2267,13	2705,49	2715,63	2294,47
WF [%]	55	45	65	25
$\bar{x} f_m$	4,88			
$\bar{x} E_{m,g}$	2946			
\bar{x} WF	47,5			

Tab. č. 90. Teplota 170°C v čase 180 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A6	B6	C6	D6
F_{\max} [kN]	0,65	1,04	1,09	1,06
f_m [N/mm ²]	3,16	5,09	5,34	5,18
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	4056,58	2215,80	3491,37	3152,29
WF [%]	45	20	30	35
$\bar{x} f_m$	4,69			
$\bar{x} E_{m,g}$	3229			
\bar{x} WF	43,3			

Tab. č. 91. Teplota 170°C v čase 1440 min (bez vyztužení)

Teplota 170 °C v čase 180 min (bez vyztužení)				
Ozn. vzorku	A7	B7	C7	D7
F_{\max} [kN]	0,33	0,45	0,52	0,52
f_m [N/mm ²]	1,61	2,20	2,54	2,53
$E_{m,g}$ [N/mm ²]	2549	3360	3377	3116
WF [%]	20	5	15	5
$\bar{x} f_m$	2,22			
$\bar{x} E_{m,g}$	3101			
\bar{x} WF	11,3			