



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 TEPLOTNÍ ODOLNOSTI VYZTUŽENÝCH DŘEVĚNÝCH PRVKŮ

STUDY OF THERMAL RESISTANCE OF REINFORCED WOOD MEMBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Janoušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Radek Janoušek
Název	Studium teplotní odolnosti vyztužených dřevěných prvků
Vedoucí práce	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Fengel, D., Wegener, G. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin; New York:1984, Walter de Gruyter, 1984, 613 s

Wald, F. a kol.: Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2005, 336 s., ISBN 80-0103157-8.

Kačíková, D., Netopilová, M., Osvald, A. Drevo a jeho termická degradácia. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, Ostrava. 80 s, ISBN 80-86634-78-7

Custódio, J., Broughton, J.G and Cruz, H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. International Journal of Adhesion and Adhesives 29(2):173-185 2009

Stoeckel, F., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W. Mechanical properties of adhesives for bonding wood—A review. International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 45, 2013, 32-41

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současné době při provádění sanací dřevěných konstrukcí je upřednostňována v případě historických objektů tradiční tesařská výměna. V případě objektů pozemního stavitelství lze využít pro zesílení konstrukčních prvků FRP materiály (ať už formou vlepaných tyčí či lamel nebo tkanin). Další možností je aplikace tkanin do plošných kompozitních materiálů, kdy takto nově vyvíjené prvky budou vykazovat vyšší tuhostní parametry. Pro zajištění dostatečně únosného prvku hraje důležitou roli trvanlivý spoj dřevo/FRP, a to jak ve vztahu k objemovým změnám vyvolaných vlhkostí, tak i odolnost proti zvýšeným teplotám.

V rámci teoretické části bakalářské práce bude provedena podrobná rešeršní analýza problematiky teplotní odolnosti FRP/dřevo. V rámci praktické části práce student provede:

1. Na základě analýz bude navržena metodika (postup zkoušení, časová závislost, volba lepidla, teplotní expozice) pro ověření teplotní odolnosti lepené spáry systému FRP/dřevo.
2. Bude aplikováno externí zesílení FRP lamelami a tkaninami u smrkového dřeva a následně se provede expozice systémů zvýšeným teplotám do 200°C.
3. Provede se statistické vyhodnocení dosažených dat.

Předpokládaný rozsah práce činí 40 - 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou teplotní odolnosti systému tvořeným dřevem jako konstrukční prvek s externím zesílením ve formě uhlíkových FRP lamel spojené různými typy lepidel. Pozornost bude věnována teplotní odolnosti vyztužených dřevěných prvků za následného působení mechanického zatížení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dřevo, FRP výztuž, konstrukční lepidla, teplotní odolnost, teplota, pevnost v ohybu, modul pružnosti, kohezní porušení.

ABSTRACT

This bachelor's thesis studies the problem of thermal resistance of a system consisting of timber as a structural member with external strengthening in the form of carbon fibre reinforced polymer lamellas connected by various types of adhesives. Attention will be paid to the thermal resistance of reinforced timber members with subsequent mechanical load.

KEYWORDS

Wood, FRP reinforcement, construction adhesives, thermal resistance, temperature, bending strength, modulus of elasticity, cohesion failure.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Radek Janoušek *Studium teplotní odolnosti vyztužených dřevěných prvků*. Brno, 2020. 66 s.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie
stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Studium teplotní odolnosti vyztužených dřevěných prvků* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 1. 6. 2020

Radek Janoušek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a poskytnutí potřebných materiálů pro zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Adamu Běťákovi za výpomoc v laboratoři, a také velké poděkování patří mé rodině za umožnění studování, podporu a pochopení.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Stavba dřeva.....	11
2.1. Mikroskopická struktura dřeva	11
2.1.1. Stavba dřeva jehličnanů.....	11
2.1.2. Stavba dřeva listnáčů	12
2.1.3. Elementy dřevní stavby.....	12
2.2. Submikroskopická struktura dřeva	16
2.2.1. Struktura vrstev buněčné stěny.....	16
3. Lepidla pro dřevěné konstrukce.....	19
3.1. Rozdělení lepidel	19
3.1.1. Syntetická lepidla.....	19
3.2. Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce.....	20
4. FRP kompozity.....	24
4.1. Popis systému	24
4.2. Materiálová báze.....	25
4.2.1. Vlákna	25
4.2.2. Matrice.....	26
4.2.3. Mezifáze ve vláknových kompozitech s polymerní matricí.....	26
5. Rešeršní analýza experimentálních studií k teplotní degradaci systému FRP.....	28
5.1. Teplotní stálost dřeva	28
5.1.1. Termická degradace dřeva.....	28
5.1.2. Mechanické vlastnosti termicky degradovaného dřeva	28
5.2. Teplotní odolnost polymerní matrice.....	31
5.2.1. Chování kompozitů FRP za působení zvýšených teplot.....	31
5.2.2. Odolnost kompozitu FRP vůči vysokým teplotám.....	33
6. Cíl práce	37
7. Sestavení metodického postupu stanovení teplotní odolnosti systému FRP/dřevo.....	38

7.1. Etapa 1 – Návrh metodiky pro ověření teplotní odolnosti FRP/dřevěných prvků ..	38
7.1.1. Teplotní odolnost dřeva.....	38
7.1.2. Teplotní odolnost lepidel.....	39
7.1.3. Teplotní odolnost FRP výztuže	40
7.1.4. Teplotní expozice	40
7.1.5. Aplikace kompozitních FRP výztuží.....	41
7.1.6. Specifikace vybraných metod opravy prvků.....	44
7.2. Etapa 2 – Praktické ověření teplotní odolnosti CFRP/dřevěných prvků.....	47
7.2.1. Specifikace použitých materiálů	47
7.2.2. Příprava zkušebních těles.....	48
7.2.3. Zkušební postupy.....	49
8. Výsledky a vyhodnocení experimentu	53
8.1. Pevnost v ohybu	53
8.1.1. Fenol-resorcin formaldehydové lepidlo	53
8.1.2. Epoxidové lepidlo	54
8.1.3. Polyuretanové lepidlo	54
8.2. Vyhodnocení výsledků a diskuze	55
8.2.1. Pevnost v ohybu	55
8.2.2. Stanovení modulu pružnosti	56
8.2.3. Stanovení kohezního porušení.....	57
9. Závěr	61
Citovaná literatura	63

1. Úvod

Již po tisíce let lidstvo využívá dřevo ve svůj prospěch. Díky jeho charakteristickým vlastnostem se dřevo začalo používat i ve stavebnictví, a to ještě před příchodem betonu. Dřevo se stalo nedílnou součástí stavebních konstrukcí a bude tomu nejspíš napořád. Proto není divu, že konstrukční dřevěné materiály přitahují zájmy výzkumů se zaměřením na jeho zlepšení pevnosti a trvanlivosti. Posílení nosných vlastností spočívá nejenom v zajištění spolehlivosti u nově postavených dřevěných staveb, ale lze spatřovat výhodu zejména u dodatečného zesilování starších dřevěných konstrukcí nevykazujících potřebnou únosnost. V posledních desetiletí se prokázal jako vynikající materiál pro zvýšení vlastností dřevěných konstrukcí kompozit tvořen polymerem vyztuženým uhlíkovými vlákny (CFRP) a to buď v podobě lamel, tyčí nebo tkanin. Pro upevnění vyztužujícího kompozitu se obvykle používají různá konstrukční lepidla [1].

Různé studie dokazují, že konstrukční dřevěné prvky s externí FRP výztuhou dosahují za normálních podmínek skvělých pevnostních výsledků. Zásahu za to nese jen druh dřeviny a FRP materiál, ale také tuhý lepený spoj, který dřevo a polymerní výztuhu spojuje.

Na stavební konstrukce jsou ovšem vyvíjeny různé škodlivé vlivy, především působení vyšších teplot, které mají negativní dopad na pevnostní stabilitu konstrukce. Jelikož má konstrukční lepidlo nižší teplotu skelného přechodu než FRP výztuha, jsou mechanické vlastnosti lepidla při teplotní expozici silně poškozeny a v důsledku toho je strukturální činnost systému lepidlem podstatně ovlivněna. Z toho důvodu je třeba při působení vyšších teplot věnovat pozornost lepidlu a jeho termické degradaci [2].

Právě tato situace je podkladem k vypracování této bakalářské práce, ve které bude zkoumána teplotní odolnost systému dřevo/FRP spojené různými druhy konstrukčních lepidel při různé teplotní expozici.

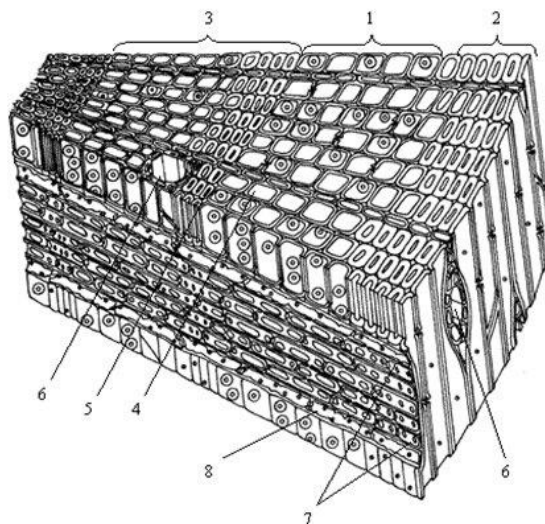
2. Stavba dřeva

2.1. Mikroskopická struktura dřeva

2.1.1. Stavba dřeva jehličnanů

Jehličnaté dřevo (měkké dřevo) má relativně jednoduchou strukturu, jelikož je složeno z **tracheid**, které zaujímají 90–95 % objemu dřeva. Tracheidy jsou dlouhé štíhlé buňky s plochými či zúženými konci (orientované ve směru vláken), které jsou vždy uzavřené a jsou uspořádány v radiálních souborech.

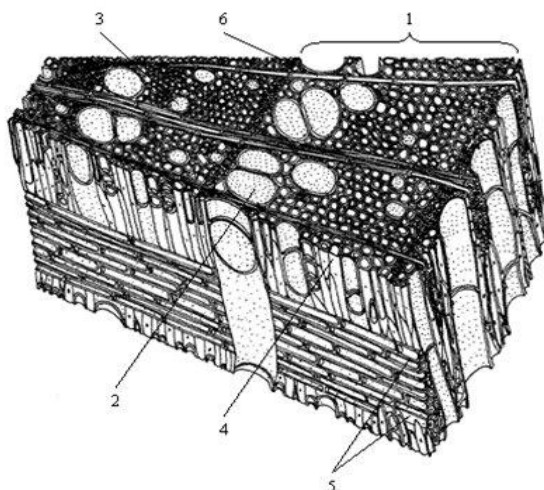
Během vývoje z jarního dřeva na letní dřevo dochází ke zmenšení průměru buněk, zatímco buněčné stěny tloustnou a zesílí. Ve finální fázi růstu dřeva jsou tracheidy vyvinuty s úzkým průměrem lumenu a silnou buněčnou stěnou – kupříkladu maximální průměr buňky u časného smrkového dřeva je 32 μm , zatímco u pozdního smrkového dřeva je minimální průměr buňky 7 μm . Široké prostorové tracheidy časného dřeva plní ve stromu funkci transportu vody a minerálů, kdežto tlusté silné stěny tracheidy pozdního dřeva dodávají kmeni **sílu a pevnost**. Měkké dřeviny (jako například modřín, smrk, borovice apod.) také obsahují radiálně orientované tracheidy propojující paprskovité parenchymatické buňky, které jsou uspořádány v radiálním směru dřeviny a slouží ke skladování a transportu asimilátů [3].



Obrázek 1) Popis struktury jehličnatého dřeva: 1 – jarní dřevo; 2 – letní dřevo; 3 – letokruh; 4 – jarní tracheida; 5 – letní tracheida; 6 – pryskyřičný kanálek; 7 – dřeňový paprsek tvořen uprostřed parenchymu s oknovitými tečkami a na okraji má příčné tracheidy se zubatými výčnělky a malými dvojtečkami; 8 – příčná tracheida [4].

2.1.2. Stavba dřeva listnáčů

Listnaté dřevo je tvořeno základní tkání pro **mechanickou pevnost** dřeva, a to díky obsahu libriformních vláken a vláknitých trachejí. V této mechanicky zpevňující tkáni jsou obsaženy **tracheje**, což jsou vodivé cévy podlouhlého trubičkovitého tvaru s často velkým průměrem lumenu a otevřenými či perforovanými konci. Tyto cévovité články vytvářejí vodivou strukturu, která je dlouhá od pár centimetrů a dosahuje až několik metrů. Rozměry vláken (trachejí) z tvrdého dřeva jsou menší než u dřeva měkkého. Tracheje z tvrdého dřeva mají výrazně tlustší buněčné stěny a užší lumeny. To má za následek vyšší mechanickou pevnost dřeva než u měkkého dřeva, kde mají tracheidy tenčí buněčnou stěnu a větší lumen. Dokonce i rozdíly v tloušťce buněčné stěny a průměrem lumenů trachejí mezi časným a pozdním dřevem nejsou tak extrémní jako u dřeva měkkého. Hustotu dřeva určuje především tloušťka buněčné stěny vláken nebo tracheid, počet a průměr cév, jakož i počet parenchymatických buněk [3].



Obrázek 2) Popis struktury listnatého dřeva: 1 – letokruh; 2 – jarní céva; 3 – letní céva; 4 – libriformní vlákno; 5 – dřeňový paprsek; 6 – podélný parenchym [4].

2.1.3. Elementy dřevní stavby

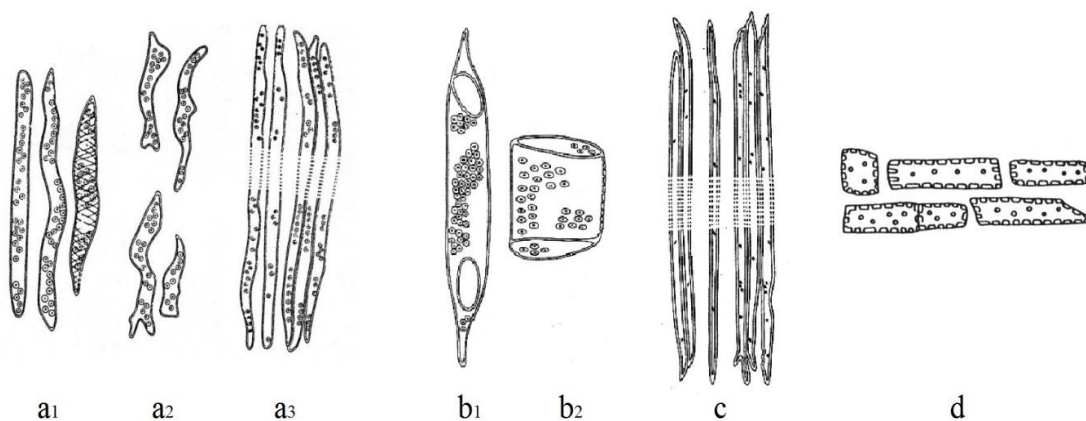
Mikroskopickou stavbu dřeva zkoumáme na preparátech dřeva pomocí mikroskopu. Mikroskopická stavba (neboli struktura) dřeva je tvořena souborem anatomických elementů, které tvoří dřevo jako takové a dodává mu jeho typické vlastnosti [5].

Každý druh dřeva je tvořen dřevními buňkami, které jsou tvořeny vodivou dutinou – lumenem a buněčnou stěnou. Lumen obepíná buněčná stěna, která má různé tvary, tloušťky, velikosti a vytváří pevnosti a mechanické vlastnosti dřeva. Tyto buňky vytváří pletiva, která mají specifické složení a umístění a podle toho mají rozlišné funkce.

Ve dřevě se nacházejí celkem tři typy buněk, kde každá má svou určitou funkci, a to:

- a) vyživovací či vodivé elementy (parenchymatické)
- b) vyztužovací elementy (sklerenchymatické – libriformní vlákna)
- c) vodivé elementy (cévy – tracheje, tracheidy) [6].

Tyto buňky jsou výsledkem vývoje a růstu dřevní tkáně, která je konstruována tak, aby splňovala přirozené potřeby stromu. Dle typu a funkce buněk rozlišujeme dřevo na jehličnaté (měkké) a listnaté (tvrdé) [3].



Obrázek 3) a1 – cévovité tracheidy; a2 – vazicentrické tracheidy; a3 – vláknité tracheidy; b1 – célula články mikrocév (tracheje); b2 – célula články makrocév (tracheje); c – libriformní vlákna; d – parenchymatické buňky [5].

Parenchymatické buňky

Parenchymatické buňky mají vodivé či vyživovací vlastnosti. Mají protáhlou, tenkou, dokonale uzavřenou buněčnou stěnu, kde se nachází množství teček. Tečky jsou vlastně neztloustlá (nebo naopak neztenčená) místa buněčné stěny a vytváří tak ve stěně buňky různě dlouhé válcovité kanálky, kudy prochází živiny a zásobní látky (například škrob nebo olej). Parenchymatické buňky zůstávají dlouho živé a v rostlém dřevě slouží k látkové výměně, obsahují protoplasmu a ukládají v sobě zásobní látky. Parenchym v jádře dřeva postupně odumírá a ukládají se v něm látky, které jádru dodávají charakteristické vlastnosti [6].

U listnatých dřevin má parenchym procentuálně větší zastoupení (8–35 %) než u dřevin jehličnatých. To způsobuje, že dřevo listnáčů potřebuje v jarním období mnohem více zásob na tvorbu nové asimilační plochy [4].

Rozlišují se různé typy parenchymatických buněk. Podle jejich uložení ve dřevě rozeznáváme:

- a) **Dřevní parenchym** vzniká příčným dělením protáhlých kambiálních buněk. Tyto buňky vytvářejí ve dřevě svislé řady s přehradkami kolnými nebo šikmými k podélným stěnám buňky. U jehličnatých dřevin je buď poblíž pryskyřičných kanálek, nebo je roztroušen mezi ostatními elementy dřevní stavby (u některých jehličnatých dřevin není vůbec vyvinut) a jeho množství se rovná 1 % objemu jehličnatého dřeva.
- b) **Paprskový parenchym** se skládá z cihlovitě tvarovaných buněk a vytváří dřevové paprsky.
- c) **Dřeňový parenchym** se podobá parenchymu paprskovému. Tvoří se ve střední části kmene a skládá se z tenkostěnných buněk (isodiametrických), které jen zřídka tloustnou [6].

Libriformní vlákna

Libriformní vlákna (neboli libriform) jsou buňky nacházející se v listnatém dřevě. Jejich hlavní funkcí je mechanické zpevnění dřeva a jejich podíl je rozdílný v závislosti na druhu dřeviny. Předpokládá se, že se nacházejí na přechodě k vřetenovitým parenchymatickým buňkám a dají se popsat i jako dřevní vlákna listnatých dřevin či jako sklerenchymatické dřevní vlákna. Tvar libriformních vláken je vřetenovitý až rourkovitý; záleží na druhu dřeviny. V některých dřevinách se vyskytují dělené libriformní vlákna mající tenké příčné příhrádky, které nedřevnatí a rozdělují vlákno na několik sekcí. Podobají se řetězcům dřevního parenchymu, ale nemají buňkový obsah [4].

Tracheidy

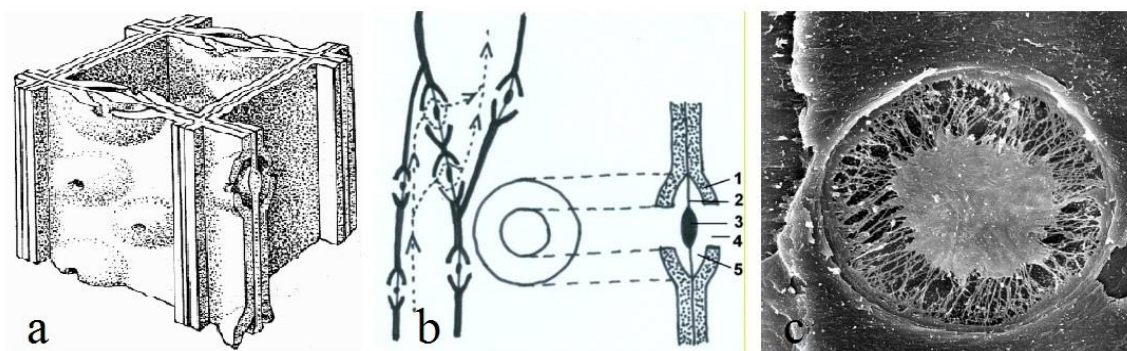
Tracheidy (neboli cévice) mají výhradně mechanickou funkci, ale také schopnost ve dřevě vést vodu, ve které jsou rozpuštěné živiny, které jsou díky tracheidám roznášeny po celé dřevině. Tracheidy mají protáhlý tvar s uzavřenými zašpičatělými konci a stejnoměrně ztloustlými buněčnými stěnami, které jsou nejčastěji vyztužené

šroubovicemi. Na stěnách mají různé typy teček nebo dvojteček, které umožňují přesun živin [6].

Podle tvaru a délky tracheidy rozeznáváme na:

- a) **Cévvité tracheidy** – nacházejí se výhradně u jehličnatých dřevin a jen u některých listnatých dřevin. Mají funkci přivádět vodu do dřeva a nacházejí se na přechodě mezi cévami a tracheidami (bez perforace). Tvarem připomínají krátké tenkostěnné kanálky s poměrně širokým lumenem a zaoblenými neperforovanými konci.
- b) **Vazicentrické tracheidy** – vyskytují se jen ve styku s cévami. Samostatně nevytvářejí vodivou funkci. Stejně jako cévvité tracheidy jsou tenkostěnné, proto je často sledujeme jako silné, pokřivené útvary.
- c) **Vláknité tracheidy** – zařazují se do skupiny dřevnatých vláken listnatého dřeva. Plní ve dřevě mechanickou funkci, ale mohou plnit i funkci vodivou a zásobovací. Mají tvar protáhlých úzkých kanálků se zašpičatělými konci, ztloustlou buněčnou stěnou a poměrně úzkým lumenem. Představují přechod mezi tracheidou a libriformním vláknem. Od libriformu se odlišují přítomností dvojteček s menším výskytem než u cévvitých tracheid [4].

U jehličnatých dřev zastupují jarní tracheidy funkci trachejí (vedou ve dřevě vodu, živiny a vzduch). Funkci nepřítomného libriformu zastupují pozdní tracheidy, které dodávají jehličnatému dřevu mechanickou pevnost [6].



Obrázek 4) a – Průřez tracheidou; b – Schéma transportu tracheidami na podélném tangenciálním řezu a řez dvůrkatou tečkou s torusem (1 – vyklenutá sekundární buněčná stěna, 2 – pružné závěsné fibrily: zbytek střední lamely a primární buněčné stěny, 3 – torus, 4 – porus, 5 – dvůrek); c – Čelní pohled na dvojtečku [7] [8].

Tracheje

Tracheje (neboli cévy) jsou elementy vyskytující se pouze u listnáčů a jejich hlavní funkcí je vedení vody. Jsou tvořeny cévovitými články vzniklé po rozpadu membrán mezi dvojtečkami. Mají různě dlouhé, tenkostěnné kanálky tvořené z cévních článků nepřesahující délku větší jak 10 mm, ovšem u některých druhů dřevin dosahuje velké délky (např. u dubu 5–18 m). Jejich množství se odráží na šířce letokruhů – během jarního období dřevina absorbuje vysoké množství vlhkosti, k čemuž je zapotřebí širší průměr cév, ale za letního období se množství a průměr nově vzniklých cév zmenšuje. S růstem šířky letokruhu podíl cév u kruhovitě pórovitých dřevin klesá.

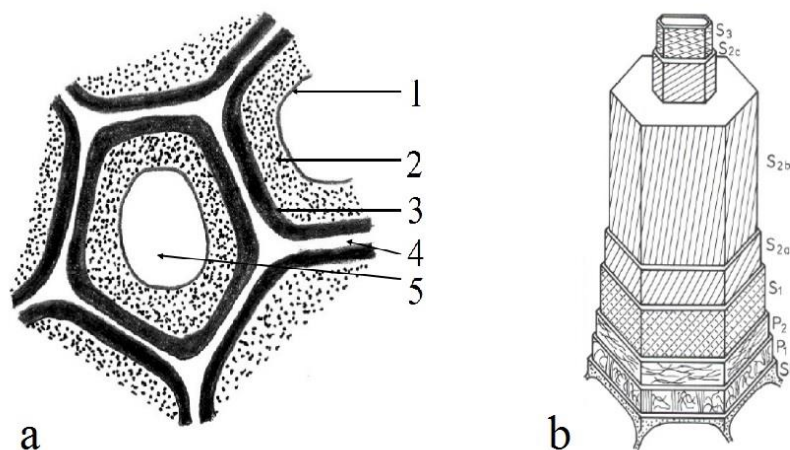
Cévy jsou charakteristické svou perforací, což je proces roztrhnutí nebo rozpuštění membrány ztenčeniny u velkých dvojteček. Cévy s jednoduchou perforací vytvoří při svém vzniku na konci cévních článků velké dvojtečky s membránou, která vyplní celý prostor buňky. Po perforaci zůstává na obvodě stěny cévy vyklenutý kruhovitý prstenec jako stopa po velké dvojtečce, jejíž membrána se rozpustila. Tvar žebříčkovité a síťovité perforace vzniká zvětšováním, rozšiřováním dvojteček v příčném směru a perforací jejich membrán [4].

2.2. Submikroskopická struktura dřeva

Po odumření živých buněk se dřevo skládá z buněčných stěn a lumenů. Buněčná stěna není homogenní – je to souvrství submikroskopických a chemicky odlišných vrstev. Mezi submikroskopickou stavbou a chemickým složením vrstev buněčné stěny jsou úzké vztahy.

2.2.1. Struktura vrstev buněčné stěny

Na příčném řezu buněk dřeva je mikroskopicky rozlišitelné několik vrstev buněčné stěny, které se odlišují strukturou i chemickým složením. Tyto vrstvy se značí: SL – střední lamela, P – primární stěna, S₁, S₂, S₃ – vrstvy sekundární stěny. Kromě termínu střední lamela se často používá termín složená střední lamela, která se skládá ze dvou primárních stěn okolních buněk a střední lamely mezi nimi (P + SL + P) [4].



Obrázek 5) a – Schéma stavby buněčné stěny sklerenchymatické buňky (1 – cytoplazmatická membrána, 2 – sekundární buněčná stěna, 3 – primární buněčná stěna, 4 – střední lamela, 5 – lumen buňky); b – Schéma stavby buněčné stěny dřevního vlákna (SL – střední lamela, P1, P2 – vrstvy primární stěny, S1, S2a, S2b, S2c, S3 – vrstvy sekundární buněčné stěny pod různými úhly) [7] [4].

Střední lamela

Buňky jsou ve dřevě spojené mezibuněčnou hmotou – střední lamelou. Střední lamela se mnohými vlastnostmi od hmoty buněčné stěny odlišuje. Pomocí světelného mikroskopu je možné pozorovat jen složenou střední lamelu, která se jeví jako úzký lesklý pás. V polarizovaném světle je možné rozlišit tři vrstvy tvořící složenou střední lamelu, ovšem kvůli jejímu malému rozměru ji není prakticky možno izolovat v nativním stavu. Tloušťka složené střední lamely závisí na druhu dřeviny a stupně lignifikace (pohybuje se v rozmezí od desetin mikrometrů do 2 mikrometrů). V závislosti na tloušťce a chemickém složení je lamela orientována v radiálním, či tangenciálním směru. V radiálním směru se střední lamela (díky své tloušťce a silnější lignifikaci) vyznačuje větší mechanickou pevností než v tangenciálním směru. Střední lamela obsahuje přibližně 70 % ligninu, který se vyskytuje ve větším množství u listnatých dřevin než u jehličnatých.

Primární stěna

Je obtížné od sebe rozlišit střední a primární stěnu. I když se od sebe liší strukturálně, po chemické stránce si jsou velmi podobné. V rostoucí buňce je primární stěna jediná, která obaluje protoplast. V tomto stádiu tvoří základní hmotu primární stěny měkká sypká hmota, složená v podstatě z pektinů a hemicelulóz, které jsou propletené

fibrilami celulózy. Růst primární stěny se zastavuje na počátku tvorby sekundární stěny. Vlhká stěna buňky má tloušťku přibližně 100 nm a v suchém stavu okolo 30 nm.

Orientace fibril v primární stěně není zcela stejná. Vnější vrstva (P_1) se vyznačuje typicky disperzní orientací celulózových fibril s výrazným odklonem od podélné osy buňky. Vnitřní vrstva (P_2) je tlustší, kompaktnější a tím můžeme pozorovat zřetelnější orientaci fibril ($0-90^\circ$ od podélné osy buňky).

Složení primární stěny se během růstu buňky mění až do body, kdy dosáhne konečných rozměrů. Tehdy začne ukládat lignin do submikroskopických prostor mezi elementy celulózy.

Sekundární stěna

Běžně se jí označuje ta část buněčné stěny, která je uložena na vnitřním povrchu primární stěny. Na rozdíl od primární stěny má sekundární stěna navzájem rovnoběžnou orientaci celulózových fibril. Sekundární stěna formuje konečný tvar buňky a má výrazný vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti vlákna. Často bývá trojvrstvá, ale může být i více či méně vrstvá – záleží na typu dřevních buněk. Tři základní vrstvy sekundární stěny (S_1 , S_2 , S_3) se od sebe liší tloušťkou, submikroskopickou strukturou a částečně i chemickým složením [4].

3. Lepidla pro dřevěné konstrukce

Lepidla používaná u nosných dřevěných konstrukcí jsou určena ke vzájemnému spojování částí dřevěných prvků, která po zatuhnutí lepidla vytváří staticky pevný celek. Cílem lepidla je vytvořit mezi částmi prvků silné adhezní spojení, které má stejně velkou pevnost a trvanlivost jako vnitřní kohezní síly uvnitř prvků. Toto spojení vzniká při vyplnění spár mezi jednotlivými prvky a vytvrzením lepidla. Spojovací vrstva musí také splňovat požadované pevnosti a předpokládanou trvanlivost [9].

3.1. Rozdělení lepidel

Lepidla se primárně dělí na přírodní a syntetická. Přírodní lepidla se dále dělí na rostlinná (zde patří například škrobová a dextrinová lepidla, pektin, klovatina nebo přírodní kaučuk atd.) a živočišná lepidla (albuminová, kaseinová a glutinová lepidla a kožní klíž) a syntetická lepidla na termoplastická, reaktoplastická polyadiční a polykondenzační [10].

3.1.1. Syntetická lepidla

Termoplastická

Mezi základní lepidla na termoplastické bázi patří:

- Polyvinylacetátové lepidla PVAc – tyto lepidla jsou v kapalné formě a vznikají polymerací vinylacetátu. Lepidla vykazují většinou třídy odolnosti D2 až D4 podle EN 204/205. Použití lepidel je pro výrobu plošných deskových dřevěných panelů určených v dřevozpracujícím a nábytkářském odvětví.
- Tavná lepidla (tuhá) jsou termoplasty, které jsou tvořené jednoduchými chemickými sloučeninami vyráběné například z kaučuku. Tato lepidla se používají například na průběžné olepování bočních ploch, či slouží jako konstrukční lepení u systémů skládacích posuvných stěn.
- Kaučuková lepidla v kapalné formě se zpracovávají kontaktním způsobem na obě plochy lepených prvků. Tato lepidla se dají použít pro lepení hran, zaoblení či dýchování menších ploch dřeva, ovšem neslouží pro nosné konstrukce.
- Polyakrylátová lepidla jsou podobná jako polyvinylacetátová lepidla, a využívají se především pro nalepování krycích materiálů na nosné dřevěné prvky [11].

Reaktoplastická – polyadiční

Mezi základní lepidla na reaktoplastické (polyadiční) bázi patří:

- Polyuretanová lepidla jsou jednosložková nebo dvousložková. Jednosložková lepidla obsahují nehořlavá rozpouštědla a lepený spoj má schopnost odolávat teplotám do 70 °C. Ovšem po přidání tvrdidla dochází ke zlepšení adhezních vlastností a lepený spoj dokáže odolávat teplotám až do 100 °C. Dvousložková lepidla rozpouštědla neobsahují, proto jsou před aplikací smíchány dvě složky, které vytváří lepidlo s vysokou pevností, pružností a vysokou odolností vůči dynamickému namáhání či vlhkosti. Jedná se o lepidla typu I dle EN 301:2018 určeného pro lepení dřevěných nosných prvků.
- Polyesterová lepidla jsou tvořena polyesterovou pryskyřicí, která se vytvrzuje za studena či za horka.
- Epoxidová lepidla jsou dvousložková lepidla (epoxidová pryskyřice a tvrdidlo) v kapalně či práškové formě a jsou schopna tuhnout za studena i za tepla [11].

Reaktoplastická – polykondenzační

Mezi základní lepidla na reaktoplastické (polykondenzační) bázi patří:

- Močovinoformaldehydová lepidla – existují ve formě kapaliny, prášku či lepidlových filmů. Jsou schopny tuhnout za studena či za tepla.
- Fenolformaldehydová lepidla – existují v kapalně formě či jako lepicí fólie.
- Melaminoformaldehydová lepidla – většinou ve formě prášku.
- Fenolresorcínofomaldehydová lepidla – patří k lepidlům s nejvyšší odolností vůči vodě [11].

3.2. Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce

Lepidla určená pro nosné dřevěné konstrukční prvky musí splňovat určité technické požadavky, které určují právě technické normy (EN 302–1:2013 až EN 302–8:2017). Jejich přesné rozdělení a charakteristiky určují následující normy:

a) Fenolická a aminová lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Klasifikace a technické požadavky

Norma klasifikuje lepidla pro nosné dřevěné konstrukce, u kterých musí lepený spoj splňovat pevnosti a trvanlivost vazby, která přísluší dané třídě po celou dobu životnosti konstrukce. Norma rozděluje fenolická a aminová lepidla na dva typy lepidel. Lepidla typu I lze použít pro lepení prvků s jejich následným použitím ve třídách použití 1, 2 a 3; a lepidla typu II lze použít pro lepení prvků s jejich následným použitím ve třídách použití 1, 2 (dle EN 1995-1-1). Třída použití 1 odpovídá prostředí, kdy rovnovážná vlhkost materiálu odpovídá klimatickým podmínkám prostředí s teplotou 20 °C a relativní vlhkostí okolního prostředí přesahující 65 % po dobu několika týdnů v roce. Třída 2 podmínkám prostředí o teplotě 20 °C a relativní okolní vlhkostí, která přesahuje 85 % (někdy i více) v průběhu několika týdnů v roce; a třída 3 prostředí, která vykazuje vyšší vlhkostní obsah než třída 2. [12].

Fenolická lepidla jsou tvořeny z termosetové syntetické pryskyřice vzniklé z kondenzační reakce fenolu s aldehydem (zástupcem je například **fenolresorcínoformaldehydová pryskyřičná lepidla PRF**). Aminová lepidla jsou termosetové pryskyřice, které vznikly z kondenzační reakce –NH nebo –NH₂ skupin aminů nebo amidů s aldehydy (například melaminmočovinoformaldehydová pryskyřičná lepidla MUF). Polykondenzační lepidlo je tvořené pryskyřicí vzniklé z polymerační reakce zahrnující eliminaci vody, obvykle s tužidlem [12].

Fenolresorcínoformaldehydová pryskyřičná lepidla (PRF)

Pro získání čisté rezorcínové pryskyřice je zapotřebí dosáhnout reakce rezorcínu (fenolická sloučenina) s formaldehydem. Přidáním tvrdidla obsahující formaldehyd do tekuté fáze lepidla se proces tuhnutí ukončí. Tvrdidlo obsahuje chemicky neaktivní plniva, která zlepšují vlastnosti lepidla pro vyplnění spáry lepeného spoje. Jelikož je rezorcínová pryskyřice drahá, bývá zčásti nahrazena levnějšími fenoly. PRF lepidlo se vytvrzuje při pokojových teplotách (15–20 °C) nebo i při vyšších teplotách. Při smíchání rezorcínu a fenolu s formaldehydem vzniká chemická reakce za vzniku sloučenin uhlíku, které lepidlu dodávají po zatuhnutí dlouhou trvanlivost, odolnost vůči vodě a při požáru nedochází u těchto lepidel k delaminaci. Lepidla PRF se řadí k typu lepidel I podle EN 301:2018 [9].

Melaminmočovinoformaldehydová pryskyřičná lepidla (MUF)

Tento druh lepidla je podobný močovinoformaldehydovým pryskyřičným lepidlům (UF), ovšem zde je močovina zčásti nahrazena melaminem, což zlepšuje odolnost lepidla vůči vodě a povětrnosti [9].

b) Emulzní polymery síťované izokyanáty (EPI) pro nosné dřevěné konstrukce – Klasifikace a funkční charakteristiky

Tato norma definuje EPI lepidla jako emulzní polymery na bázi vody či směsí emulzních polymerů na bázi vody zesítěné izokyanátem, který v lepidle funguje jako tužidlo. Dále klasifikuje EPI lepidla jako lepidla pro konstrukční účely, které mají za úkol vytvořit lepený spoj tak pevný a trvanlivý, aby byla zachována integrita lepené vazby (určující třídou použití) po celou dobu životnosti konstrukce. EPI lepidla se dle normy dělí na 2 typy. Typ I se zařazuje do 1. a 2. třídy použití – s klimatickými podmínkami charakterizované obsahem vlhkosti v materiálu odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkostí okolního prostředí přesahující 65 % po dobu několika týdnů v roce a zároveň do třídy s obsahem vlhkosti v materiálu o teplotě 20 °C a relativní okolní vlhkostí, která přesahuje 85 % v průběhu několika týdnů v roce. Typ II se zařazuje do 1. třídy použití – s klimatickými podmínkami charakterizované obsahem vlhkosti v materiálu odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkostí okolního prostředí přesahující 65 % po dobu několika týdnů v roce.

Norma dále stanovuje maximální tloušťku vrstvy použitého lepidla (0,1 mm, 0,2 mm nebo 0,3 mm) a maximální teplotu při zkouškách lepidel (50 °C, 70 °C nebo 90 °C) [13].

c) Jednosložková polyuretanová (PUR) lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Klasifikace a funkční požadavky

Tato norma definuje jednosložkové polyuretanové (PUR) lepidla jako lepidla složená z isokyanátů obsahující uretanové polymery, které reagují s vodou a vytváří tak síťovanou strukturu [14]. Po nanesení lepidla na povrch dřeva dochází k reakci mezi reaktivní složkou isokyanátu a vlhkostí dřeva za vzniku aminu, který dále reaguje se zbývajícím isokyanátem a vytváří tak polyuretanovou pryskyřici [9].

PUR lepidla jsou podle této normy klasifikovány podle dvou typů. Typ I jsou lepidla vhodná pro klimatické podmínky charakterizované obsahem vlhkosti

v materiálech odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkostí okolního prostředí nad 65 % (ve většině měkkých dřevin ovšem průměrný obsah vlhkosti nepřesáhne 12 %) nebo relativní vlhkostí okolního prostředí, která přesahuje 85 % (někdy i více; průměrná vlhkost ve většině měkkých dřevin nepřesáhne 20 %) po dobu několika týdnů v roce. Typ II se používá jen u klimatických podmínkách charakterizovaných obsahem vlhkosti v materiálu odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkostí okolního prostředí nad 65 %. Norma také stanovuje maximální tloušťku vrstvy lepidla při použití (0,1 mm, 0,3 mm nebo 0,5 mm) a maximální zkušební teplotu lepidla (50 °C, 70 °C a 90 °C) [14].

d) Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Kaseinová lepidla – Klasifikace a funkční požadavky

Norma definuje hlavní složku kaseinových lepidel – kasein, jako bílkovinu získanou z vysrážení odstředěného mléka a po smíchání s dalšími reaktanty vytváří lepivou hmotu vhodnou pro lepení lamelového dřeva. Kaseinová lepidla se používají při teplotách do 50 °C [15].

4. FRP kompozity

4.1. Popis systému

FRP materiál (*Fiber Reinforced Polymer*) je kompozitní materiál sloužící pro dodatečné zesilování betonových, dřevěných, ocelových a jiných stavebních konstrukcí. Systém FRP lze využít pro zpevnění dřevěných novostaveb, nebo jako dodatečné zvýšení nosnosti stávajících konstrukcí či ke zvýšení nosnosti poškozených nosných prvků [16].

FRP výztuže ve formě tyčí, lamel nebo tkanin lze efektivně využít při konstrukčních opravách či sanacích dřevěných konstrukcí. Mohou být vloženy v kritických místech pro zajištění vyšší únosnosti nebo pro přenos zatížení, když jsou poškozené konce nosníků odříznuty a nahrazeny novým dřevem nebo epoxidovým nátěrem. Techniky vyztužování jsou obvykle založeny na použití lepidel na místě a použitím postupů, které jsou běžné pro opravu nebo modernizaci betonových a kovových konstrukcí [17].

Polymerní výztuže jsou na rozdíl od ocelových výztuží více odolné vůči agresivním chemikáliím (kyseliny, chloridy apod.). Jejich hlavní výhodou je korozivzdornost, odolnost vůči působení magnetického pole (nestíní radiový signál), jsou nevodivé, velice lehké, a proto je s nimi jednoduchá manipulace. FRP výztuže mohou mít (s ohledem na zvolené složení) výrazně vyšší tahové pevnosti než klasické ocelové výztužné vložky.

Systém FRP je heterogenní materiál tvořen dvěma základními složkami ve formě jednosměrně orientovaných vláken plnící nosnou funkci a polymerní maticí sloužící jako pojivo, která přenáší zatížení mezi vlákny a poskytuje ochranu vláken. Při použití správného typu a poměru obou složek získáme kompozit s vysokými pevnostními vlastnostmi. Komponentní FRP lamely jsou složeny výhradně z uhlíkové výztuže tvořící nosnou výplň a epoxidové pryskyřice sloužící jako pojivo (CFRP). Lepidla jsou na bázi epoxidových pryskyřic bez rozpouštědel [16].

Tabulka 1) Vlastnosti vláken a polymerů (HM – Vysoký modul pružnosti; HS – Vysoká pevnost v tahu) [17].

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při porušení [%]	Koeficient tepelné roztažnosti [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	Hustota [g/cm^3]
E-sklo	70 – 80	2000 – 4800	3,5 – 4,5	5,0 – 5,4	2,5 – 2,6
Uhlík (HM)	390 – 760	2400 – 3400	0,5 – 0,8	-1,45	1,85 – 1,90
Uhlík (HS)	240 – 280	4100 – 5100	1,60 – 1,73	-0,6 do -0,9	1,75
Aramid	62 – 180	3600 – 3800	1,9 – 5,5	-2,0	1,44 – 1,47
Čedič	82 – 110	860 – 3450	5,5	3,15	1,52 – 2,70
Polymer	2,7 – 3,6	40 – 82	1,4 – 5,2	30 – 54	1,10 – 1,25

4.2. Materiálová báze

FRP kompozity jsou kombinací polymerních pryskyřic působících jako matrice nebo pojivo, se silnými a tuhými vláknitými sestavami, které působí jako výztužná fáze.

4.2.1. Vlákná

Vlákná tvoří 30 až 70 % objemu kompozitu a 50 % jeho hmotnosti. Hlavní funkcí vláken je přenášení zatížení a zajištění tuhosti, pevnosti, tepelné stability a dalších konstrukčních vlastností materiálu. Vlákná musejí mít vysoký modul pružnosti, vysokou pevnost v tahu, nízkou variabilitu pevností mezi vlákny, vysokou stabilitu pevnosti během zpracování a vysokou rovnoměrnost průměrů a rozměrů povrchu mezi vlákny.

Ve stavebních konstrukcích dominuje více druhů vláken:

- a) *uhlíková vlákna (CFRP)* se vyrábějí z prekurzorových vláken z ropné smoly, umělého hedvábí nebo polyakrylonitrilu (PAN). Vlákná na bázi PAN se používají v CFRP pro konstrukční vyztužení a zpevnění díky své vysoké kvalitě a pevnosti. Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti a nejsou náchylné k agresivnímu prostředí a vysokým teplotám.

Existují dva typy uhlíkových vláken – vlákna s vysokou pevností v tahu (*High strengths HS*) a vlákna s vysokým modulem pružnosti (*High modulus HM*).

- b) *skleněná vlákna (GFRP)* jsou nejvíce převládající vlákna používané v průmyslu vyztužených polymerů. V železobetonových konstrukcích se používá více druhů skleněných vláken (AR – sklo, E – sklo, S – sklo).

- c) *aramidová vlákna (AFRP)* mají vysokou pevnost v tahu vůči poměru hustoty.

- d) *čedičová vlákna (BFRP)* jsou odolné vůči alkalickému, kyselému a solnému prostředí [18].

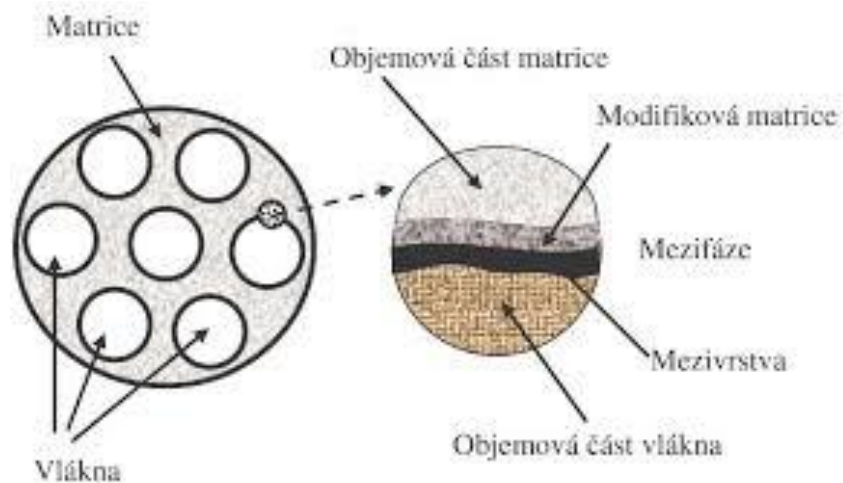
4.2.2. Matrice

Jelikož vlákna mají malý průřezový rozměr, nemohou se v technologické výrobě používat přímo a z toho důvodu jsou vkládána do matrice. Matricí přenášené napětí namáhá vlákna do meze jejich pevnosti a tím se dosáhne nejvyššího ztužení vláken. Matrice má důležitou funkci spojit vlákna ve výztuži do vhodné struktury, která poté vytváří odolný celek. Zároveň matrice vytváří povrchovou ochranu bránící proti mechanickému či chemickému poškození, které by později vedlo ke ztrátě pevnosti komponentu. Matrice musí zajistit správný přenos napětí do vláken, čímž dosáhne díky vhodné stykové ploše mezi matricí a vlákny. V kompozitech vyztuženými krátkými vyztužovacími vlákny dochází k horšímu přenosu napětí z matrice do vláken než v kompozitech se spojitými vlákny.

Pro výrobu FRP matrice lze použít celou řadu pryskyřic. Jako materiál pro vytvoření matrice se nejčastěji používají nenasyčené polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy a fenolické pryskyřice pro kompozity s výrazně sníženou hořlavostí. Při výrobě vláknových kompozitů se celosvětově (z celkového objemu zpracovaných pryskyřic) používají ze 75 % nenasyčené polyestery, 20 % vinylestery a 5 % speciální pryskyřice (fenolické, epoxidy, vysokoteplotní pryskyřice atd.).

4.2.3. Mezifáze ve vláknových kompozitech s polymerní matricí

Jelikož u dlouhvláknových polymerních kompozitů matrice ke zvýšení pevností nijak nepřispívá, jsou hlavním nositelem pevnosti a tuhosti vyztužující vlákna. Ve srovnání s polymerní matricí mají vlákna o jeden až dva řády vyšší pevnost a modul pružnosti. Při působení vnějšího namáhání se polymerní matrice deformuje více než vyztužující vlákna, čímž vznikají na rozhraní vlákno – polymer smykové síly. Tenké vrstvy na rozhraní vlákno – polymer se označuje jako **mezivrstva**. Mezivrstva ovlivňuje velikost přenosu napětí z nepevné matrice do vláken. Ta společně s modifikovanou částí polymerní matrice tvoří kompozitní mezifázi [19].



Obrázek 6) Schématické kompozitní mezifáze [19].

Při dosažení dokonalé adheze mezi polymerní matricí a vlákny dochází k tomu, že veškerá napětí působící na výztuž nesou dlouhá vyztužující vlákna. V tomto stavu nepevná, ale deformovatelná matrice prakticky nepřenáší žádné napětí. Čím větší objem vláken komponent obsahuje, tím významnější je úloha mezivrstvy. U běžného objemového podílu vláken (30–50 %) o průměru 10–25 μm je na mechanické vlastnosti rozhodující vliv mezifáze. Pokud je ovšem adheze mezi vlákny a polymerní matricí špatná, dochází ke ztrátě ztužujících vlastností a tím i ke snadnému poškození kompozitního materiálu [19].

5. Rešeršní analýza experimentálních studií k teplotní degradaci systému FRP

5.1. Teplotní stálost dřeva

5.1.1. Termická degradace dřeva

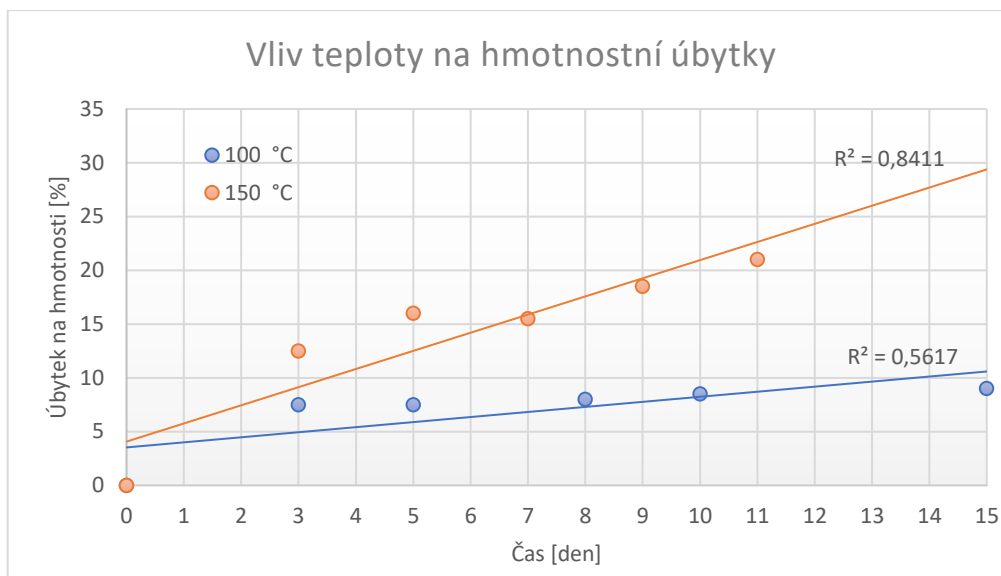
Teplota zvýšená nad 100 °C má negativní vliv na fyzikální, strukturální a chemické vlastnosti dřeva. Pod 100 °C se termická degradace dřeva projevuje úbytkem hmotnosti dřeva, změnami v lignin – sacharidové matici a změnami fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Rychlost degradace je ovšem nízká, proto je nemožné stanovit dolní hranici započínající termickou degradaci. Při termické degradaci dřeva probíhají různé chemické reakce, jako například dehydratace, polykondenzace, statická degradace a termo oxidace. To způsobuje změnu pevnostních vlastností dřeva, pokles relativních molekulových hmotností hlavních složek, aktivní degradace sacharidového podílu, a nakonec bezplamenné a plamenné hoření [20].

5.1.2. Mechanické vlastnosti termicky degradovaného dřeva

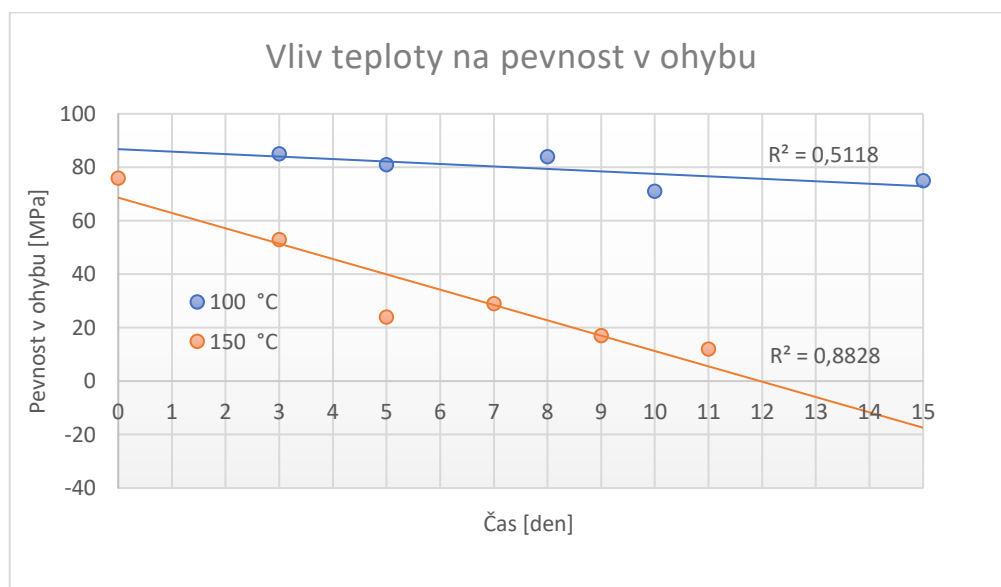
Dřevo díky svým výjimečným vlastnostem patří mezi materiály se širokým uplatněním ve stavebnictví. Jeho hlavními vlastnostmi je mechanická odolnost a zejména pružnost a pevnost. Výhodou dřeva z hlediska konstrukčního materiálu je jeho relativně nízká hmotnost při dosažení vysokých pevností. Tyto vlastnosti řadí dřevo mezi jedny nejpoužívanější konstrukční materiály.

Byl proveden experiment, ve kterém byly zkoumány vybrané mechanické vlastnosti dřeva, a to změna úbytku na hmotnosti zkoumaného dřeva a jeho pevnost v ohybu při působení zvýšených teplot. Bylo použito smrkové dřevo, které bylo po dobu 15 dní vystaveno teplotám 100 °C a 150 °C. Teploty byly z hlediska vzniku požáru nízké, stejně tak i teplotní diference 50 °C.

Dlouhodobé namáhání smrkového dřeva teplotou 100 °C nezpůsobilo téměř žádné změny na sledovaných vlastnostech dřeva. Ovšem při dlouhodobém ohřevu **teplotou 150 °C** nastaly podstatné **změny v úbytku na hmotnosti** i podstatné **změny v ohybové pevnosti** dřeva. Výsledky experimentu jsou graficky znázorněny v grafech 1) a 2) [20].



Graf 1) Vliv teploty na úbytek hmotnosti smrkového dřeva při dlouhodobém teplotním namáhání [20].

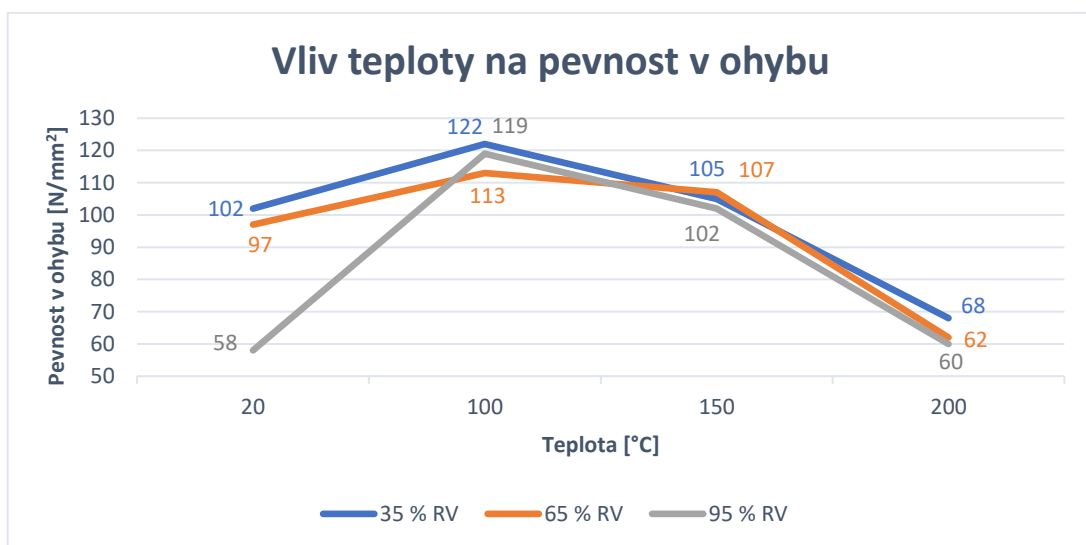


Graf 2) Vliv teploty na pevnosti v ohybu smrkového dřeva při dlouhodobém tepelném namáhání [20].

Z naměřených výsledků je tedy zřejmé, že k počátku **termické degradace dřeva dochází při tepelném namáhání nad 100 °C**. Následně je také dokázáno, že **termické namáhání dřeva (konkrétně smrkového) má vliv na konečné pevnosti** dřevěného dílce. A to platí i u ostatních druhů dřevin.

Podobně jako u předchozího experimentu byla provedena studie [21] vlivu zvýšené teploty na mechanické vlastnosti smrkového dřeva. Jedním z hlavních cílů této studie bylo zhodnotit vliv relativní vlhkosti a teploty na rozměrové změny a mechanické

vlastnosti smrkového dřeva. Vzorky dřeva upravené v různých relativních vlhkostech (35 %, 65 % a 95 %) byly podrobeny tepelnému zpracování po dobu 24 hodin teplotami 20 °C, 100 °C, 150 °C a 200 °C. Stanovovala se pevnost v ohybu a modul pružnosti podle DIN 52186:1978. Výsledky ukázaly, že tepelné zpracování mělo za následek zejména zlepšení rozměrové stability dřeva, ale snížení jeho mechanických vlastností. U vzorků zahřátých na vyšší teploty ze 100 °C na 200 °C byl průměrný pokles pevnosti v ohybu asi 44–50 %, zatímco modul pružnosti byl snížen pouze o 4–9 %. Nejvyšších hodnot pevnosti v ohybu bylo dosaženo při teplotní expozici 100 °C, ovšem po překročení této teploty došlo ke snížení pevnosti v ohybu i modulu pružnosti. Dle výsledků dále vyplývá, že vzorky vystavené teplotní expozici 20 °C měly dokonce nižší pevnosti v ohybu (o 5 – 20 %) než vzorky vystavené teplotě 100 °C a 150 °C. Nejnižších pevností se dosáhlo u teplotní expozice 200°C. Modul pružnosti byl nižší u sušených vzorků při 20 °C a relativní vlhkosti 95 %, ale vyšší než u vzorku s 35 % relativní vlhkostí a teplotou 100 – 200 °C. Z výsledků je patrné, že **vysoká teplota** má významný vliv na mechanické vlastnosti smrkového dřeva a **má větší vliv na pevnost v ohybu než na modul pružnosti** [21].



Graf 3) Vliv teploty tepelného zpracování na pevnosti v ohybu smrkového dřeva při různých relativních vlhkostech [21].

Během zpracování (zejména během sušení) může dřevo podléhat změnám mechanických vlastností, i když rychlost a průběh těchto změn se u jednotlivých druhů dřeva liší. Dnes existuje společný trend směřující k vysokoteplotnímu sušení dřeva, které je motivováno zejména kratší dobou tepelného zpracování, nižší spotřebou energie a pravděpodobně menší deformací. Studie publikované v literatuře týkající se vlivu

vysokých teplot na mechanické vlastnosti dřeva vykazují odlišné výsledky. Některé studie [22] [23] [24] ukázaly, že pevnost v ohybu byla snížena po vysokoteplotním sušení, ale nebyl prokázán žádný vliv na modul pružnosti. Jiné studie [25] naopak neprokázaly žádný vliv vysokoteplotního sušení na pevnost v ohybu, zato mírné zvýšení modulu pružnosti po sušení při vysoké teplotě ano. Podle výzkumu [26] je patrné, že sušení při různých teplotách (70 °C, 140 °C a 180 °C) neovlivnilo mechanické vlastnosti pevného dřeva, pokud nebylo vysušeno na obsah vlhkosti pod 10 %. Ve studiích modifikace masivního dřeva při vysokých teplotách bylo pozorováno, že mechanické vlastnosti dřeva klesají pravděpodobně v důsledku chemických a strukturních změn dřeva [23] [27]. Z dřívějších výzkumů je známo, že **dřevo vystavené vysokým teplotám se stává rozměrově stabilnějším** [28] [29] [30] [31]. Nicméně **pevnost** a obzvláště tuhost s ní je nevyhnutelně **snížena**. Ze studie [30] autor dochází k závěru, že tepelné zpracování dřeva má za následek velké snížení obsahu hemicelulózy a zlepšuje tak rozměrovou stabilitu dřeva [21].

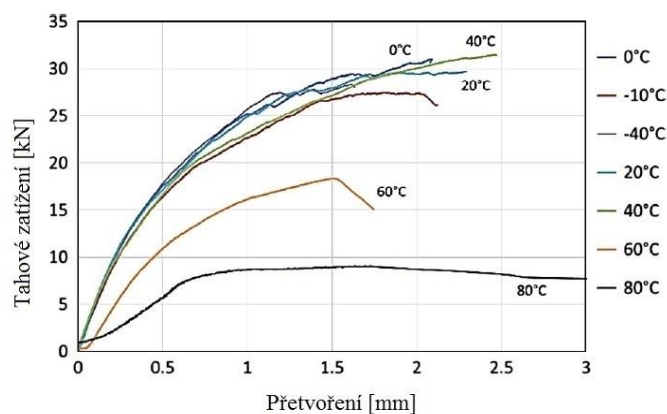
5.2. Teplotní odolnost polymerní matrice

Kompozity vyztužené vlákny (FRP) jsou široce používány při opravách betonových nebo dřevěných konstrukcí. Dlouhodobé působení systémů s vazbou FRP však může být vážně ovlivněno při dlouhodobém vystavení agresivnímu prostředí. Může dojít k rozkladu FRP – dřevěná vazba v důsledku dlouhodobé expozice v agresivních podmínkách prostředí, včetně vlhkosti, alkalických roztoků, ultrafialového záření, změny teploty během dne a cyklů zmrazování a rozmrazování. Kromě toho je vliv působení požáru na FRP vyztuže dalším bezpečnostním problémem v kompozitních strukturách. Mezi těmito účinky je jeden z nejkritičtějších faktorů právě vliv zvýšené teploty, který vede ke zhoršení mezifázových vazeb FRP vyztuhy [32].

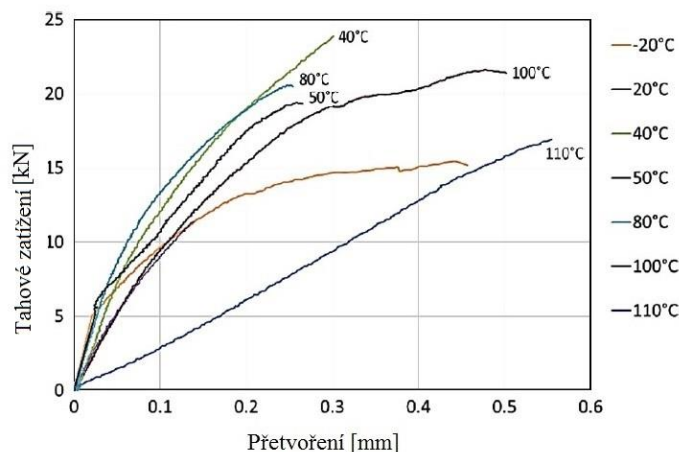
5.2.1. Chování kompozitů FRP za působení zvýšených teplot

Výzkumné zkoušky [33] otestovaly dva rozdílné FRP systémy namáhané různými teplotami od -40 °C do 120 °C s kombinací mechanického zatížení. První systém (dále jen Systém 1) kombinuje jednosměrné vrstvy z uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice aplikované technikou mokrého vrstveného nanášení a druhý systém (dále jen Systém 2) využívající prefabrikované FRP lamely o tloušťce 1,2 mm aplikované lepicí technikou pomocí epoxidového lepidla. Experimentální části práce charakterizují mechanické vlastnosti pryskyřice použité v systému mokrého nanášení a lepidlo použité

v lepeném systému pod zkoumaným rozsahem teplot. Obě tyto metody byly aplikovány na zkušební betonové dílce, na kterém se posléze prováděly tahové zkoušky. Výsledky ukázaly, že **snížení mechanických vlastností pryskyřice** použité v **Systému 1** začíná v době, kdy teplota přesáhne 40 °C, ale významný pokles se projevuje až při **60 °C a při 80 °C**, kdy dochází k **pevnostnímu selhání**. Výsledky pro **lepidlo (Systém 2)** ukazují mírné snížení mechanických vlastností při 50 °C, významnější snížení při 80 °C, ale materiál zcela **ztrácí svou tuhost při teplotě skelného přechodu (nad 100 °C)**. Tyto výsledky zhruba **definují teplotu skelného přechodu pryskyřice a lepidla** použitého v obou systémech. Při porovnání výsledků chování zatížení a přetvoření (Graf 4, 5) u obou systémů ukazuje, že systém využívající spojované FRP lamely (Systém 2) má mnohem tužší vlastnosti než Systém 1, který používá techniku mokrého nanášení. Přetvoření v Systému 2, které je založeno na mnohem tužším systému FRP, je přibližně třikrát menší než v Systému 1. Úrovně zatížení při poruše pozorované u obou systémů, stejně jako obecné trendy v dopadu tepelných efektů, jsou však spíše podobné [33].



Graf 4) Vliv zatížení při tahovém namáhání na délkové přetvoření vrstvy s vlákny a epoxidovou pryskyřicí za působení různých teplot [33].

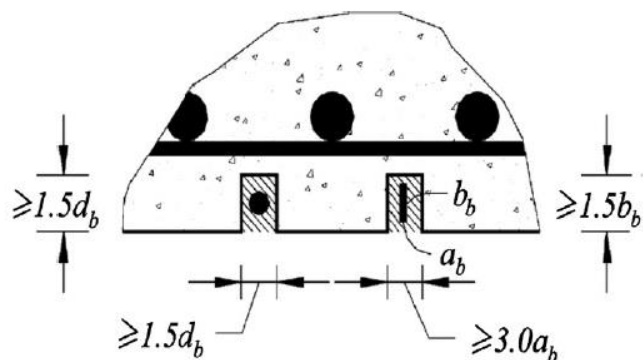


Graf 5) Vliv zatížení při tahovém namáhání na délkové přetvoření prefabrikovaného FRP pásu za působení různých teplot [33].

5.2.2. Odolnost kompozitu FRP vůči vysokým teplotám

Ačkoli FRP kompozity jsou nyní široce uznávány jako účinné materiály pro civilní výstavbu, je zde problém spojený s chováním FRP materiálů v požární situaci. Konstrukční prvky jsou vystaveny vysoké teplotě nad 600 °C. V takovém požárním prostředí nemůže systém FRP odolávat běžnému zatížení v důsledku snížené únosnosti. Polymerní pryskyřice se může stát kaučukovou a viskózní teplota se zvýší na 65 °C až 150 °C. Při teplotách nad 400 °C jsou systémy FRP citlivé na spalování polymerní matrice, a dokonce i na odpařování. Zapálení polymerní matrice při vysoké teplotě může vést k uvolnění kouře, tepla a toxických výparů. Proces spalování FRP systémů je velmi komplikovaný. Vlákna mohou být rozložena a matrice může ztratit svůj vazný účinek. Nakonec nejsou konstrukční prvky vyztužené FRP schopny plnit své nosné funkce [32].

V posledním desetiletí zesílené polymerní vlákno vyztužované na povrchu (*Near surface mounted* – NSM FRP) získalo velkou pozornost jako nová zpevňující technika pro železobetonové konstrukce. Při této technice jsou na povrchu betonového dílce vyříznuty drážky, do kterých jsou následně vloženy lamely či tyče FRP. Specifikace ACI 440.2 doporučují, aby velikost drážky pro FRP tyč byla minimálně 1,5násobek průměru tyče, kdežto pro FRP lamel velikost drážky musí být alespoň $3,0a_b \times 1,5b_b$, kde a_b je nejmenší rozměr lamely a b_b je délka druhého okraje (viz obr. 7) [34].



Obrázek 7) Schéma velikosti drážky pro instalaci NSM CFRP výztuže [34].

Otvory se posléze zaplní epoxidovým lepidlem nebo cementovou zálivkou, což vytváří jistou úroveň ochrany v případě požáru. Ve srovnání s konvenčními posilovacími technikami, jako je externě vázaná (*external bonded – EB FRP*) výztuž, může NSM výztuž efektivně využít plnou pevnost FRP výztuže. Jelikož jsou vložené FRP lamely nebo tyče spojeny s betonem na třech, či více plochách, může mezi betonem a výztuží dojít k většímu přenosu napětí. Uvedené údaje ukazují, že u identických betonových prvků zpevněné ekvivalentním množstvím externí a NSM FRP výztuhy umožňuje výztuž NSM FRP dosáhnout vyššího deformačního napětí s pomalejším nárůstem teploty než výztuž v externě lepeném systému EB FRP. Ačkoli NSM FRP vykazuje uspokojivou pevnost vazby s betonovým podkladem, v požárních podmínkách je stále vážným problémem, a to vzhledem k citlivosti epoxidu na vysoké teploty [34].

Vzhledem k tomu, že pevnost vazby a vlastnosti modulu pružnosti při vysoké teplotě jsou pro vyhodnocení požární odolnosti betonových prvků vyztužené NSM FRP kritické, byla provedena experimentální studie pro vyhodnocení degradace vlastností vazby při vysoké teplotě [34].

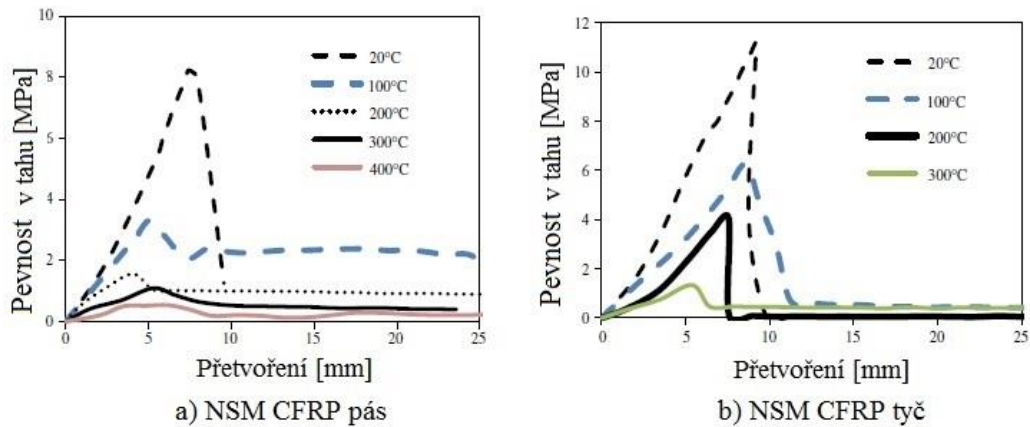
Experimentální studie [34] se zabývá vlivem vysoké teploty na pevnost v tahu a modulu pružnosti betonu vyztuženého vlákny na povrchu (NSM FRP). Vzorky byly vyrobeny s použitím různých typů epoxidových lepidel (epoxid Tyfo S a Tyfo T300) a různých typů FRP výztuží (CFRP lamely 4,5 x 13,5 mm a tyče 6,4 mm), které byly osazeny do betonového dílce (150 x 150 x 400 mm) a testovány, aby se vyhodnotila pevnost vazby v teplotním rozsahu od 20 °C až do 400 °C při působení tahového zatížení. Během přípravy vzorků NSM FRP byl jeden konec CFRP výztuže spojen s betonovým

blokem a druhý konec byl upevněn silnou kotvou, která usnadňovala uchopení CFRP výztuže při tahovém zatížení [34].

Výsledky z těchto testů ukazují, že pevnost vazby a modul pružnosti se vlivem zvětšujících se teplot výrazně snižují a při 200 °C si udržují pouze 20–30 % jejich původních hodnot. Toto rychlé zhoršení je způsobeno především změkčením epoxidu nad teplotou **skelného přechodu T_g** (kolem 80 °C), a tak dochází k degradaci adheze mezi CFRP výztuhou a epoxidem. Během testu vykazují oba epoxidy významnou **degradaci vlastností vazeb**, což naznačuje, že **hodnota 100 °C je blízká nebo dokonce vyšší než T_g** (oblast sklovitého stavu) epoxidů. Při teplotě nad 200 °C dochází k roztavení a rozkladu epoxidového lepidla, čímž se vlastnosti pojiva dále zhoršují. Vzhledem k tomu, že systém NSM FRP již ztratil většinu své pevnosti a tuhosti při přibližně 200 °C, je rychlost degradace v této fázi relativně nízká. Pozorování během testů vazeb ukazuje, že epoxid začíná hořet při teplotě kolem 400 °C a toto poškození poškozuje i vazbu NSM. Pevnost vazby se tak stává zanedbatelnou při 400 °C pro CFRP lamely a při 300 °C pro CFRP tyče [34].

Tabulka 2) Naměřené pevnosti v tahu a jejich přepočty na pevnostní ztráty vzniklé působením různých teplot na vzorky NSM CFRP s použitím epoxidu Tyfo T300 [34].

	Teplota	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C
a) NSM CFRP lamela	Pevnost v tahu [MPa]	8,2	3,3	1,6	1,2	0,5
	Ztráta pevnosti [%]	0	59,8	80,5	85,4	93,9
b) NSM CFRP tyč	Pevnost v tahu [MPa]	11,2	6,3	4,1	1,3	-
	Ztráta pevnosti [%]	0	43,8	63,4	88,4	-



Graf 6) Grafické znázornění vlivu pevnosti v tahu na délkové přetvoření pro vzorky NSM CFRP s použitým epoxidem Tyfo T300 při působení různých teplot [34].

Podle vyhodnocených výsledků je také zřejmé, že CFRP tyče mají o něco vyšší pevnost vazby s epoxidem než CFRP lamely. U stejného typu epoxidu jsou však měřené síly vazby u tyčí a lamel velmi podobné. To znamená, že **při vysokých teplotách tvar FRP výztuže** (lamela či tyč) vlastnosti vazby NSM FRP systému **nijak významně neovlivňuje**. Závěrem bylo zjištěno, že systém NSM FRP s epoxidem typu Tyfo T300 vykazuje vyšší pevnost vazeb a modul pružnosti než u systému s použitím epoxidu Tyfo S [34].

6. Cíl práce

Hlavní náplní praktické části této bakalářské práce je **ověření teplotní odolnosti systému FRP/dřevo** při vystavení teplotní expozici do 160 °C. V teoretické části je proveden rešeršní průzkum vlivu zvýšených a vysokých teplot na mechanické vlastnosti dřeva a systémy externího zesílení pomocí FRP výztuže, a to při různém mechanickém namáhání. Z provedených rešerší byl upřesněn vliv působení zvýšených teplot na charakteristické vlastnosti dřeva i FRP výztuže a jejich pevností. Jelikož je lepený spoj za zvýšených teplot pevnostně nejslabším článkem v nosných dřevěných konstrukcích, stal se v této práci předmětem bližšího zkoumání.

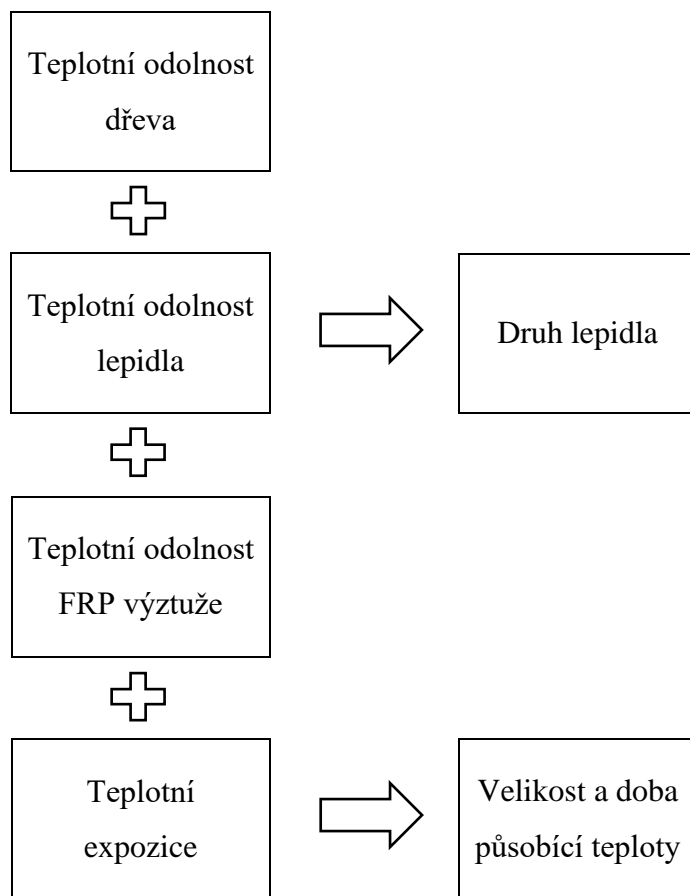
V experimentální části práce je posuzován vliv použitého druhu konstrukčního lepidla na odolnost zesilovaného systému vůči působení zvýšených teplot vyjádřený pevnostními parametry. Dále je zkoumán adhezivní účinek použitých komponentů a typ kohezního poškození.

Výsledkem experimentu je vyhodnocení pevnostní odolnosti použitého druhu adheziva v systému FRP/dřevo proti zvýšeným teplotám. Díky těmto výsledkům lze předpokládat rozšíření znalostí v oblasti výzkumu teplotní odolnosti konstrukčních lepidel pro tyto aplikace dodatečného zesilování dřevěných prvků.

7. Sestavení metodického postupu stanovení teplotní odolnosti systému FRP/dřevo

7.1. Etapa 1 – Návrh metodiky pro ověření teplotní odolnosti FRP/dřevěných prvků

Níže uvedené tabulkové schéma označuje vlivy na výslednou teplotní odolnost systému dřevo/FRP:



7.1.1. Teplotní odolnost dřeva

V teoretické části bakalářské práce byl posuzován experiment [20] zabývající se teplotní degradací smrkového dřeva při působení vyšších teplot, a to 100 °C a 150 °C po dobu 15 dní. Bylo zjištěno, že při 100 °C žádné výrazné změny pevností nenastaly, ovšem **při působení 150 °C nastaly podstatné změny v ohybové pevnosti dřeva.**

Druhá studie [21] prokázala, že při působení **teplot 150 °C a 200 °C** po dobu 24 hodin způsobuje u smrkového dřeva **pokles pevnosti v ohybu až o 50 %.**

To je důkaz, že působení vyšších teplot **nad 100 °C má významný vliv na mechanické vlastnosti smrkového dřeva, které bylo zvoleno pro experiment této studie** (odolnost jiných druhů dřevin nebude dále zkoumána).

7.1.2. Teplotní odolnost lepidel

Každé lepidlo určené pro konstrukční účely má svou vlastní odolnost vůči zvýšeným teplotám. Tyto hodnoty jsou stanovené výrobcem a je nutné se podle těchto informací řídit.

Jednosložková polyuretanová lepidla určená pro nosné dřevěné konstrukce jsou složena z isokyanátů obsahující uretanové polymery, které reagují s vodou za vzniku síťované struktury. Lepidlo aplikované na dřevo reaguje s jeho vlhkostí a tím dochází ke vzniku aminu, který dále reaguje s lepidlem, čímž vytváří polyuretanovou pryskyřici. Dle normy ČSN EN 15425:2017 mají tato lepidla schopnost **odolávat teplotám až do 90 °C**. To značí, že teplota skelného přechodu bude dosahovat podobných hodnot [9] [14].

Pro zhotovení experimentu bylo **vybráno polyuretanové lepidlo KESTOPUR 1030**.

Epoxidová lepidla jsou tvořena z epoxidové pryskyřice, zesíťované pomocí tvrdidla (nejčastěji aminy). Tato lepidla mají vysokou odolnost vůči klimatickým podmínkám, schopnost přilnout k široké škále materiálů s následným vyplněním mezer povrchu. Epoxidová lepidla se používají nejen ke spojování dřevěných konstrukčních prvků, ale také k jejich opravě na místě. Teplota skelného přechodu, snižující pevnostní charakteristiky lepidla, se pohybuje dle typu epoxidu **v rozmezí teplot 70 až 90 °C** [35].

Pro zhotovení experimentu bylo **vybráno epoxidové lepidlo EPOLAM 2017**.

Fenolická lepidla jsou tvořena z termosetové syntetické pryskyřice vzniklé z kondenzační reakce fenolu s aldehydem. Typickým zastáncem fenolických lepidel jsou fenol-resorcin formaldehydová pryskyřičná lepidla (PRF), které po zatuhnutí získávají dlouhou trvanlivost, odolnost vůči vodě a vysokým teplotám. Dle normy je u testování fenolických lepidel aplikována **maximální teplota do 90 °C** [12] [34].

Pro experiment bylo **vybráno lepidlo typu PRF systém 1711/2520**.

7.1.3. Teplotní odolnost FRP výztuže

Z hlediska materiálové báze FRP výztuže (Uhlík, Aramid, E-sklo, Čedič a Polymer) jsou teplotní odolnosti jednotlivých typů materiálů rozdílné. Materiály tvořící výztuhu FRP výztuže jsou uvedeny v tabulce č. 1, kde nejmenších hodnot koeficientu tepelné roztažnosti dosahuje Aramid a Uhlík. Uhlík ovšem vykazuje vyšší pevnostní odolnost a vyšší modul pružnosti, a hlavně i vyšší odolnost vůči zvýšeným teplotám.

Z hlediska matrice jsou vlákna uložena většinou v termosetové matrici. Mezi nejčastěji používaným materiálem tvořící matrici FRP výztuže bývají epoxidová, vinyl esterová, fenolická či polyesterová pryskyřice.

Nejčastěji používaná FRP výztuž je tvořena právě směsí uhlíkových vláken a maticí z epoxidové pryskyřice. Experimentální výzkum [33] zkoumal mechanické vlastnosti právě tohoto typu výztuže. Výsledky ukázaly, že snížení mechanických vlastností epoxidové pryskyřice začíná v době, kdy **teplota přesáhne 40 °C, ale významný pokles se projevuje až při 80 °C**, kdy dochází ke skelnému přechodu epoxidové matrice a tím pádem k počátku pevnostního selhání FRP výztuže.

Díky získaným informacím lze vyvodit, že **nejslabší částí FRP výztuže je její polymerní matrice**.

Pro vyhotovení experimentu byla použita uhlíková FRP výztuž s maticí z epoxidové pryskyřice **typu MC–DUR CFK Lamela E**.

7.1.4. Teplotní expozice

Z výše uvedených zjištění je tedy zřejmé, že vystavení systému dřevo/FRP zvýšeným teplotám má negativní dopad na pevnostní charakteristiky jednotlivých druhů materiálu. Z těchto zjištění byly navrženy teploty pro stanovení teplotní odolnosti FRP – dřevěných spojů, a to **účinky teplot 20 °C, 140 °C a 160 °C**.

Zároveň je také jisté, že kromě velikosti teploty má signifikantní vliv na odolnost materiálů vůči zvýšeným teplotám i délka teplotní expozice. Běžně fungují předpisy, které určují minimální výdrž teploty po dobu 24 hodin. Nicméně z hlediska požární bezpečnosti staveb je většina konstrukcí navrhována na daleko nižší doby. Z toho důvodu byla zvolena **doba teplotní expozice na 120 minut**.

7.1.5. Aplikace kompozitních FRP výztuží

Zesilovací FRP systémy jsou tvořeny nejčastěji skleněnými nebo uhlíkovými vlákny vložené do polymerní (často epoxidové) matrice. Takto zhotovenou výztuží lze vyztužit konstrukce tvořené z betonu, zdiva nebo dřeva, a to různými způsoby, při kterých jsou použity odlišné typy těchto výztuží. Umístění **výztuže ve formě tyčí** se provádí buďto uvnitř prvku (pro nové konstrukce) nebo jako dodatečná výztuž umístěná v blízkosti povrchu vyztužovaného prvku. Pro dodatečné zesilování se používají **výztuže ve formě lamel nebo tkanin (rohoží)**, které se umisťují jako vnější výztuž na povrch prvku [16].

Kompozitní výztuž FRP tyč

FRP výztuž ve formě tyče je určena pro betonové konstrukce, kde je výztuž uložena uvnitř prvku a nahrazuje tak tím klasickou ocelovou výztuž. Jedná se o heterogenní materiál skládající se ze jednosměrně orientovaných uhlíkových či skleněných vláken. Tyto vlákna tvoří nosnou složku komponentu a zaujímají hmotnostně 75 až 80 % obsahu celé výztuže. Pojivo tvoří polymerní epoxidová matrice, ve které jsou vlákna uložena. FRP výztuž je tak vyráběna ve tvaru spirálovitě ovinuté tyče o různých průměrech (nejčastěji 5–18 mm) a pro lepší soudržnost s okolním betonem je opatřena povrchovou úpravou, a to nanesením křemičitého písku zalitého v pryskyřici [16].



Obrázek 8) FRP výztuž (zleva) – GFRP (výztuž se skleněnými vlákny), C-GFRP (výztuž s uhlíkovými a skleněnými vlákny), CFRP (výztuž s uhlíkovými vlákny) [16].

Vzájemným poměrem a typem obou složek jsou získány výsledné vlastnosti kompozitu. Narozdíl od klasické ocelové výztuže má kompozitní výztuž podstatně vyšší odolnost vůči agresivním chemikáliím. Je velice lehká, nevodivá a díky svým korozivzdorným vlastnostem není nutné dodržovat tloušťku krycí vrstvy s ohledem na trvanlivost konstrukce. Se správným poměrem složek může FRP výztuž dosáhnout výrazně vyšších tahových pevností než ocelová výztuž.

Nevýhodou FRP výztuže je pokles mechanických charakteristik, které jsou ovlivněny působením pH betonu během životnosti konstrukce. Další nevýhodou FRP tyčí je jejich nízký modul pružnosti, který způsobuje snížení výsledné tuhosti konstrukce a také při porovnání s klasickou ocelovou výztuží dosahuje nízké odolnosti vůči působení vysokých teplot.

FRP tyče jsou díky svému složení vhodné pro vyztužení betonových prvků, které jsou vystaveny působení agresivního prostředí a u kterých běžně dochází k rychlé degradaci krycí vrstvy za následné korozi ocelové výztuže. Díky využití kladných vlastností FRP kompozitu lze dosáhnout výrazně levnější údržby konstrukce a její delší životnosti. Kompozitní výztuž lze ohýbat do různých tvarů, ovšem pouze při nevytvrzeném stavu při výrobě (není možné výztuž tvarovat na místě). Tato výztuž je primárně určena pro uložení do tahových oblastí konstrukčních prvků. Neslouží jako nosný prvek v tlačných oblastech [16].

Kompozitní výztuž FRP lamela

Tato výztuž je standardně vyráběna z vysokopevnostních uhlíkových vláken (více jak 70 % hm.) jednosměrně uložené do epoxidové pryskyřice. Rozměry lamel bývají nejčastěji 50 x 1,2 (1,4) mm nebo 30 x 1,0 mm o libovolné délce. FRP lamela slouží pro dodatečné zesilování betonových, dřevěných, ocelových či jiných kompozitních konstrukcí, a to ve vnějším i vnitřním prostředí. Lamelová výztuž se aplikuje lepením do drážek nebo na povrch konstrukčního prvku. Takto systém dosáhne dodatečného zvýšení nosnosti stávajících konstrukcí nebo znovuobnovení únosnosti poškozených nosných prvků či omezení šířek trhlin [16].



Obrázek 9) FRP výztuž ve formě lamely složená z uhlíkových vláken v epoxidové pryskyřici [16].

Výhodou FRP lamely je především vysoká tahová pevnost při malém průřezu a nízké stavební výšce. FRP lamela odolává zvýšeným teplotám do 120 °C, nekoroduje a díky nízké hmotnosti lze s výztuží snadno manipulovat. Samotná montáž lamely je tedy

jednoduchá a díky tomu lze výztuž aplikovat například na svislých stěnách nebo na spodní stranu stropních konstrukcí. Vyztužující lamely lze překřížovat, ovšem není možné je ohýbat.

Často jsou lamelové výztuže opatřeny ochrannou fólií, kterou je třeba před použitím výztuže odstranit. Povrch vyztužovaného prvku musí být suchý, vyrovnaný, pevný, bez jakýchkoli volných částí, prachu, nečistot a mastnoty. Na takto připravený povrch se nanáší vrstva adheziva o tloušťce minimálně 1 mm a stejným množstvím lepidla je opatřena i lamela. Lepidlem musí být vyplněny veškeré nerovnosti podkladu a póry. Následně se lamela umístí na konstrukci, rovnoměrně se přitlačí pomocí gumového válečku a vytlačené lepidlo se odstraní. Po vytvrzení lepidla lze výztuž překrýt maltou nebo opatřit nátěrem (to zabrání případné degradaci výztuže vlivem UV záření) [16].

Kompozitní výztuž FRP tkanina

FRP výztuž ve formě tkaniny je standardně vyráběna z jednosměrně či nepravidelně uložených vysokopevnostních uhlíkových vláken (více jak 98 % hm.). Podobu nabývá nekonečného pásu o šíři 300 nebo 600 mm. Tento vysoce pevnostní systém je určen pro dodatečné zesilování betonových, dřevěných, ocelových a dalších kompozitních konstrukcí. Výztuž lze použít pro dodatečné zvýšení nosnosti stávajících konstrukcí, či pro zvýšení nosnosti poškozených nosných prvků. Výhodou FRP tkaniny je její vysoká pevnost a nízká hmotnost, která zajišťuje snadnou manipulaci, a tedy jednoduchou montáž. Tkanina je také opatřena ochrannou fólií [16].



Obrázek 10) Kompozitní FRP výztuž ve formě tkaniny tvořena z uhlíkových vláken [16].

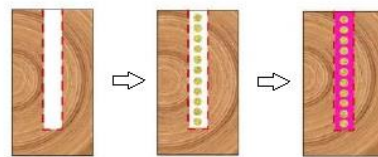
Uhlíková tkanina se lepí na povrch konstrukce a při aplikaci musí být povrch vyztužovaného prvku pevný, suchý, bez volných částic, nečistot a mastnot. Samotnou tkaninu není nutné nijak upravovat, ochranná fólie rohože se ponechává na místě. Na

povrch konstrukce se nanáší minimálně 1 mm vrstvy adheziva (epoxidová pryskyřice) tak, aby lepidlo zaplnilo případné nerovnosti a póry v podkladu. Na místo opatřené lepidlem se přiloží výztuž a rovnoměrným přitlačením gumovým válečkem je tkanina zatlačena do lepidla. Takto lepidlo smáčí všechna vlákna a prostupuje až k ochranné fólii. Důležité je, aby výztuž byla zcela celoplošně nasycena (zalita) laminovací pryskyřicí. Fólie se po zatvrdnutí lepidla odstraní a tkaninu lze následně překrýt maltou nebo opatřit nátěrem či další vrstvou rohože. FRP tkaninu lze také aplikovat omotáním výztuže kolem nosného prvku [16].

7.1.6. Specifikace vybraných metod opravy prvků

Při opravách a restaurování budov tvořené dřevěnými prvky je možnost využití několika různých metod oprav. Tyto metody závisí na způsobu poškození dřevěných prvků a od toho se odvíjí vybraný systém opravy. Nejčastější metodou je vlepování FRP výztuže do nosného prvku, čímž se docílí opětovného získání nosných vlastností konstrukce a zároveň estetické úpravy prvku. Podstatou vlepování FRP výztuže je vyřezání (či vyvrtání) drážky do prvku, která se následně zalije epoxidovou zálivkou. Do takto připravené drážky se vloží FRP výztuž a ta je posléze opětovně zalita epoxidovým lepidlem. Po zatvrdnutí lepidla se povrch mechanicky opracuje a esteticky upraví pomocí dřevěných zátek nebo texturovanou maltou [36].

- **Úprava prvku a zesílení nosníku** – zesílení prvku se provádí vyřezáním drážky o určitých rozměrech po celé délce nosníku. Do drážky se paralelně nastaví optimální množství prutů s minimálně 10 mm odstupem od sebe, a ty se následně zalijí epoxidovou zálivkou. Po odvodušnění se zálivka doplní dle potřeby [36].



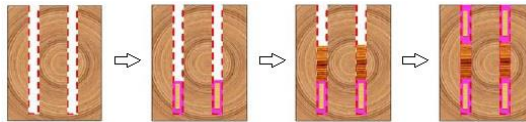
Obrázek 11) Postup vyztužování dřevěného nosníku pomocí FRP prutů [36].

- **Zesílení prvku v tahové nebo tlakové části** – tento způsob vyztužení spočívá v tom, že vyřezaná drážka je nejdříve zaplněna epoxidovým lepidlem a až následně je do drážky vložena výztuž ve formě FRP prutu či lamely. Toto vyztužení se také provádí i jako kombinace posílení v tlakové a tahové části prvku (viz obr. 12). Pro zefektivnění posílení se v dané vzdálenosti od drážky vytvoří případně další drážka, čímž se zvýší rozsah zesílení [36].



Obrázek 12) Postup vyztužování dřevěného nosníku pomocí FRP lamel [36].

- **Zesílení prvku v tahové a tlakové části** – zesílení prvku v tlakové i tahové části je velice podobný předchozímu typu, ovšem s tím rozdílem, že se vytvoří jen hluboká drážka. Do této drážky se postupně ukládá vrstva epoxidové zálivky, kde je vložena lamelová FRP výztuž a ta je utěsněna vloženými dřevěnými klíny. Následně proběhne opětovné zalití drážky lepidlem a vložení druhé FRP výztuže [36].



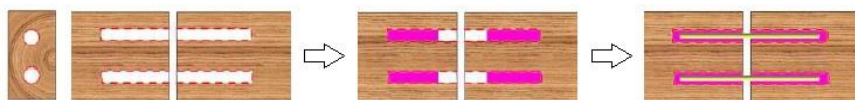
Obrázek 13) Postup vyztužování dřevěného nosníku pomocí FRP lamel [36].

- **Zesílení lepeného lamelového dřeva** – zesílení dřevěného prvku touto metodou spočívá v navrtání otvorů ze spodní strany prvku pod úhlem 30 ° od vodorovné polohy prvku. Do vyvrtaných slepých otvorů se vstříkuje lepidlo a následně vkládají předem zkrácené FRP tyče [36].



Obrázek 14) Postup vyztužování dřevěného nosníku pomocí FRP prutů [36].

- **Oprava zhlaví nosníku** – touto metodou docílíme výměny zhlaví dřevěného prvku novou dřevěnou částí. Do opravovaného prvku jsou ve směru vláken vyvrtány otvory, do kterých se penetruje lepidlo a následně vkládá FRP tyč. Tento samý postup se provádí na nové přidané části. Opravovaný prvek je takto spojen s novou částí dřevěné konstrukce [36].



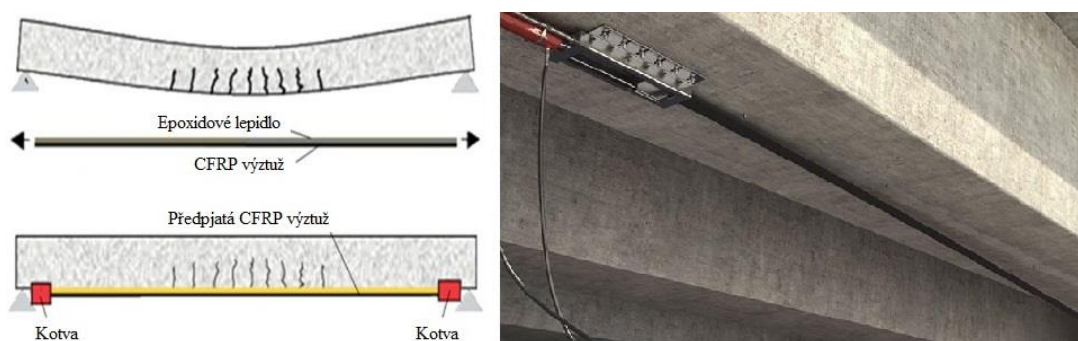
Obrázek 15) Postup opravy dřevěného nosníku nadstavením pomocí FRP prutů [36].

Další variantou opravy zhlaví nosníku je prováděno vlepováním uhlíkových FRP lamel na povrch v místě styku spojovaných prvků. Nejdříve se provede odstranění porušené části dřeva (to je obvykle ukončeno šikmým řezem). Po vytvoření vnějších drážek mezi původním a nově zavedeným dřevem se otvory drážek zaplní epoxidovým lepidlem a následně se vloží výztužné prvky [17].



Obrázek 16) Oprava dřevěného nosníku pomocí CFRP lamel připevněné na povrchu zešikmeného spoje nového a stávajícího prvku [17].

- **Předpětí FRP výztuže** – zesilovací účinnost FRP materiálu může být zlepšena jeho předpětím. Pomocí hydraulického zařízení se do FRP výztuže vnese tahové napětí, které (po upevnění výztuže na nosník) vytváří významné tlakové napětí ve spodní části nosníku. Tlakové napětí je v rozporu s tahovým napětím nosníku (způsobené vnějším zatížením) a tím dochází ke zvýšení ohybové pevnosti nosníku [17].



Obrázek 17) Vyztužení prvku pomocí předpjetí CFRP výztuže (vlevo – proces aplikace a předpjetí CFRP výztuže na nosník; vpravo – připevněná kotva s přichystanou CFRP lamelou) [37].

7.2. Etapa 2 – Praktické ověření teplotní odolnosti CFRP/dřevěných prvků

7.2.1. Specifikace použitých materiálů

Dřevěný adherend

Jako zkušební vzorek nahrazující nosnou dřevěnou konstrukci bylo vybráno smrkové dřevo ve formě hranolů skutečné velikosti. Smrkové dřevo se běžně používá jako stavební materiál díky svým poměrným pevnostem a pružnosti. Neopracované hranoly byly vytvořeny o rozměrech (šířka/výška/délka) 80 x 120 x 1100 mm v celkovém množství 27 kusů. Všechny vzorky byly dlouhodobě uloženy v prostředí se stejnou relativní vlhkostí a teplotou z toho důvodu, aby kvůli vlhkosti nebyly ovlivněny výsledky měření.

FRP výztuž

Pro pevnostní zesílení dřevěných hranolů byla vybrána externí výztuž tvořena polymerem vyztužený uhlíkovými vlákny (CFRP) typu MC–DUR CFK lamela E o rozměrech (šířka/výška/délka) 50 x 1,2 x 1100 mm. Tento laminát tvořený matricí z epoxidové pryskyřice je vyztužený jednosměrně uspořádanými uhlíkovými vlákny, díky čemuž dosahuje vysokých tahových pevností, malé hmotnosti a nízké stavební výšce. CFRP se dnes již běžně používá pro zesílení stávajících konstrukcí či novostaveb [38].

Tabulka 3) Technické hodnoty FRP výztuže typu MC-DUR CFK-Lamela E [38].

Technické hodnoty MC-DUR CFK-Lamela E		
Vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Pevnost v tahu	$\geq 2\,900$	[MPa]
E-modul charakteristický	≥ 210	[GPa]
Zlomová tažnost	$\geq 1,20$	[%]
Obsah vláken	≥ 68	[objem. %]
Hustota	1,60	[kg/dm ³]

Lepidla

K vytvoření pevné vazby systému dřevo/FRP byla zvolena tato lepidla:

- Fenol-resorcin formaldehydové pryskyřičné lepidlo – **PRF lepidlo systém 1711/2520** (Akzo Nobel)

Tabulka 4) Technické údaje lepidla PRF systém 1711/2520 [39].

Technické údaje lepidla PRF systém 1711/2520		
	1711	2520
Produkt	FRP lepidlo	Tvrdidlo
Pevnostní stav	kapalný	kapalný
Viskozita [mPa.s]	3 000 – 8 000	5 000 - 13 000
pH při 25 °C	7,0 - 9,0	3,5 - 6,0
Suchý obsah [%]	54 - 57	3,5 - 6,0
Hustota [kg/m ³]	1 150	1 200
Mísící poměr s tvrdidlem	100 : 15 (L : T)	

- Epoxidové lepidlo – **EPOLAM 2017** (Axson technologies)

Tabulka 5) Fyzikální a mechanické vlastnosti lepidla EPOLAM 2017 se standardním tvrdidlem [40].

Fyzikální a mechanické vlastnosti EPOLAM 2017		
Viskozita lepidla při 25 °C	2 850	[mPa.s]
Mísící poměr s tvrdidlem	100:30 (L:T)	[objemové díly]
Ohybový modul pružnosti	3 000	[MPa]
Pevnost v ohybu	132	[MPa]
Tahový modul	3 700	[MPa]
Pevnost v tahu	73	[MPa]
Teplota skelného přechodu T _g	89	[°C]

- Jednosložkové polyuretanové lepidlo – **KESTOPUR 1030** (Kiilto)

Tabulka 6) Technické údaje použitého konstrukčního lepidla KESTOPUR 1030 [41].

Technické údaje lepidla KESTOPUR 1030		
Objemová hmotnost	1 500	[kg/m ³]
Viskozita	5 000	[mPa.s]
Spotřeba	150 až 300	[g/m ²]
Otevřený čas	max. 30 min., 20 °C	-
Lisovací čas	min. 90 až 120 min., 20 °C	-
Vlhkost dřeva	10 až 20	[%]

7.2.2. Příprava zkušebních těles

Pro efektivnější spojení dřeva a CFRP výztuže byly dřevěné hranoly povrchově upraveny. Pomocí hoblovky byla na hranolu (na straně tahového zatížení) vytvořena drážka o hloubce 2 mm a šířce přizpůsobené pro uložení CFRP lamely. Drážka byla následně očištěna od třísek a jiných nežádoucích těles, které by mohly ovlivnit adhezivní

účinek lepidla. Ze stejného důvodu byla provedena povrchová úprava CFRP výztuže ošetřením ethanolem pro odmaštění povrchu.

Následně se provedlo samotné lepení. Lepidlo bylo aplikováno formou roztírání po drážce dřevěného hranolu a po kontaktní očištěné ploše lamely; posléze proběhlo přiložení CFRP lamely. Tvrzení lepidla probíhalo (bez působení vnějšího tlaku na spoj) za laboratorních podmínek, tedy za pokojové teploty 20 °C v suchém prostředí (50 %) po dobu 7 dní.



Obrázek 18) Hoblovkou vyřezané drážky v dřevěném trámci spolu s již nalepenou CFRP výztuží.

7.2.3. Zkušební postupy

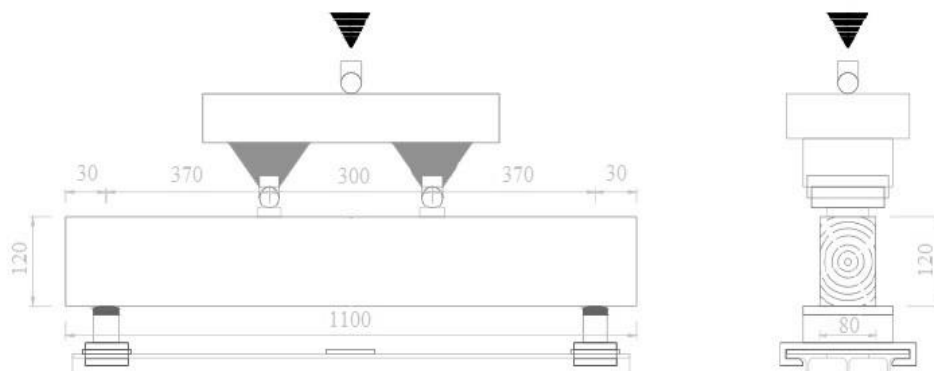
Následující zkušební postupy byly provedeny na celkově 27 vzorcích, z čehož pokaždé 3 vzorky jsou zkoušeny v sadě pro jednu teplotní expozici s použitím jednoho typu lepidla.

Teplotní expozice

Po řádném vytvrzení lepeného spoje byly postupně všechny vzorky umístěny do laboratorní horkovzdušné sušárny, kde byly vystaveny třem vybraným rozdílným teplotám (20 °C, 140 °C a 160 °C). Pro kontrolu teploty byl do lepené spáry zaveden termočlánek. Vzorky byly v sušárně umístěny do doby, kdy teplota uvnitř lepeného spoje odpovídala požadované teplotě a při těchto tepelných podmínkách následně setrvaly v sušárně po dobu 120 minut. Po uplynulé době se ze sušárny vzorky vyjmuly, zakryly tepelně izolační folií (z důvodu tepelné stálosti vzorku) a okamžitě se uložily do zkušebního lisu pro stanovení pevnosti v ohybu 4–bodovým zatížením.

Stanovení pevnostních a tuhostních parametrů

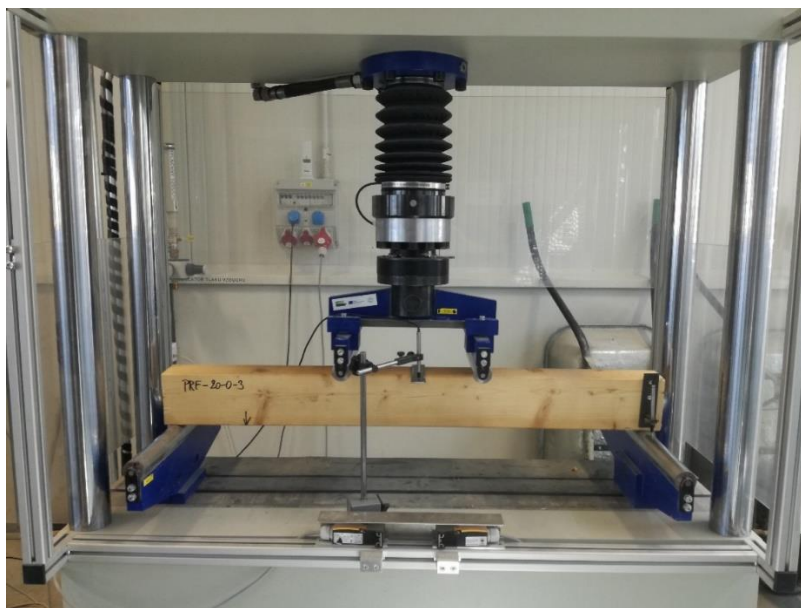
Podstatou zkoušky je stanovení pevnosti v ohybu 4–bodovým zatížením zkoušených těles pomocí zkušebního lisu postupem v souladu s ČSN EN 408 + A1:2012. Zkušební tělesa jsou vystavena ohybovému momentu od zatížení přenášeného pomocí zatěžovacích a podpěrných válečků. Při průběhu zkoušení se zaznamená největší dosažené zatížení zkoušených těles a díky této hodnotě se vypočítá pevnost v ohybu [42].



Obrázek 19) Grafické schéma zatěžovací zkoušky zkušebním lisem pro stanovení pevnosti v ohybu vzorků po účinku teplotní expozice [43].

Zkušební postup

Ke zkušebnímu tělesu vyjmutému ze sušárny se pomocí vrutů připevnilo ocelové úchytky na tenzometry (uprostřed a v místě podpírání trámce). Díky tenzometrům bylo možné určit modul pružnosti zkoumaného vzorku (průhyb měřený extenzometrem uprostřed rozpětí s odpočtem deformace způsobené zatlačením v podpoře). Trámec se centricky (podélnou osou vzorku kolmo k podélným osám válečků) umístil na dva podpěrné válečky zkušebního lisu, které měly od sebe vzdálenost 1040 mm. Plocha trámce s CFRP výztuhou byla uložena směrem dolů – plocha na kterou působí tah. Následně se spustily dva horní zatěžovací válečky (o mezi vzdálenosti 300 mm) kloubově připevněny k příčnému závěsu lisu. Před samotným zatěžováním je třeba kontroly, zda jsou všechny povrchy válečků v kontaktu s povrchem zkoušeného vzorku. Při počátku zatěžování je rychlost zatížení konstantní, plynulá a bez nárazů. Po počátečním působení zatížení (nepřesahující více jak 20 % předpokládaného zatížení) se pomalu zvyšuje konstantní rychlost zatížení o ± 1 % až do porušení vzorku. Výsledkem je zaznamenání maximálního zatížení, díky kterému se vypočítá pevnost v ohybu [42].






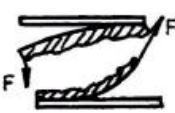
Obrázek 20) Zkouška pevnosti v ohybu 4–bodovým zatížením spolu se stanovením modulu pružnosti pomocí připevněných tenzometrů uprostřed a v místě podpírání zkoušeného trámce.

Stanovení způsobu poškození lepené spáry

Pro určení porušení lepeného spoje platí příslušná norma ČSN ISO 10365:1995. Tato norma uvádí hlavní označení typů porušení lepeného spoje a ilustruje typy porušení pomocí referenčních obrázků. Normu lze použít pro všechny mechanické zkoušky lepených spojů bez ohledu na povahu adherendu a lepidla tvořících lepený spoj.

Adhezní porušení je definováno jako prasknutí lepeného spoje, které se zjevně projeví oddělením na rozhraní lepidlo/adherend. **Kohezní** porušení je pak definováno jako prasknutí lepeného spoje, při kterém se oddělení zjevně projeví buď v lepidle, nebo adherendu. Označování typu porušení lepeného spoje se používá při klasifikaci typu porušení za účelem lepšího posouzení výsledku mechanické zkoušky adheze lepeného spoje, který je obvykle vyjádřen kvantitativně naměřenou hodnotou [44].

Kohezní porušení bylo stanoveno po působení zkoušky pevnosti v ohybu, kde často docházelo k mechanickému poškození a rozrušení spoje. Vizuálním odhadem byl poté stanoven procentuální podíl kohezního porušení lepené spáry, dřeva a FRP výztuže s přesností na 10 %.

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

Obrázek 21) Grafické znázornění různých typů kohezního a adhezního porušení [44].

8. Výsledky a vyhodnocení experimentu

Pro stanovení odolnosti vyztužených dřevěných prvků vůči účinku zvýšených teplot za mechanického namáhání bylo vybráno smrkové dřevo, které bylo po úpravách zesíleno externí uhlíkovou CFRP výztuží ve formě lamel. Tato polymerní výztuž byla k dřevěným zkušebním trámům připevněna pomocí vybraných konstrukčních lepidel určené pro nosné dřevěné konstrukce, které splňují požadavky určené technickými normami EN 302:2013–2018. Takto vyztužený dřevěný dílec byl vystaven různým teplotám v laboratorních sušárnách a následně byla provedena zkouška stanovení pevnosti v ohybu. Během zkoušek mechanického namáhání byla zaznamenávána největší působící síla zatížení do doby, kdy zkoušený prvek přestal vykazovat pevnostní charakter, a naopak začalo docházelo k úbytku nosných pevností. Po provedení mechanických zkoušek následně proběhla optická kontrola kohezního porušení mezi komponenty. Za vyhodnocení se považuje stanovení pevnosti v ohybu v závislosti na velikosti vystavené teploty, stanovení modulu pružnosti prvku a stanovení způsobu poškození lepeného spoje a ostatních částí vyztuženého prvku.

8.1. Pevnost v ohybu

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky měření celkem 27 zkoušených vzorků. Dřevěné trávce zpevněné CFRP výztuží byly podrobeny působení rozdílných teplot (20 °C, 140 °C a 160 °C) a následně 4–bodovému ohybovému zatížení. Tabulky rozdělené podle druhu použitého lepidla dále obsahují hodnoty modulu pružnosti a kohezního porušení jednotlivých částí prvku.

8.1.1. Fenol–resorcin formaldehydové lepidlo

Výsledky měření prvků s použitím lepidla PRF systém 1711/2520 od výrobce Akzo Nobel.

Tabulka 7) Průměrné hodnoty zkoušeného systému dřevo/FRP spojeného lepidlem PRF systém 1711/2520.

Teplotní expozice [°C]	Fenol-resorcin formaldehydové lepidlo (PRF)					
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		Kohezní porušení [%]	
	Průměrná hodnota f_m	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota $E_{m,g}$	Směrodatná odchylka	FRP výztuž	Dřevo
20	54,9	16,2	15,7	1,1	23	47
140	27,0	2,3	11,7	0,9	82	3
160	24,5	4,8	12,5	0,0	78	7

8.1.2. Epoxidové lepidlo

Naměřené hodnoty systému dřevo/FRP s použitím lepidla Epolam 2017 od výrobce Axson technologies.

Tabulka 8) Průměrné hodnoty zkoušeného systému dřevo/FRP spojeného lepidlem Epolam 2017.

Teplotní expozice [°C]	Epoxidové lepidlo (EP)					
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		Kohezní porušení [%]	
	Průměrná hodnota f_m	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota $E_{m,g}$	Směrodatná odchylka	FRP výztuž	Dřevo
20	45,2	7,4	16,0	1,3	28	62
140	26,7	3,4	12,1	0,4	0	100
160	23,3	4,5	9,5	3,0	72	15

8.1.3. Polyuretanové lepidlo

Výsledné hodnoty měření prvků s použitím lepidla Kestopur 1030 od výrobce Kiilto.

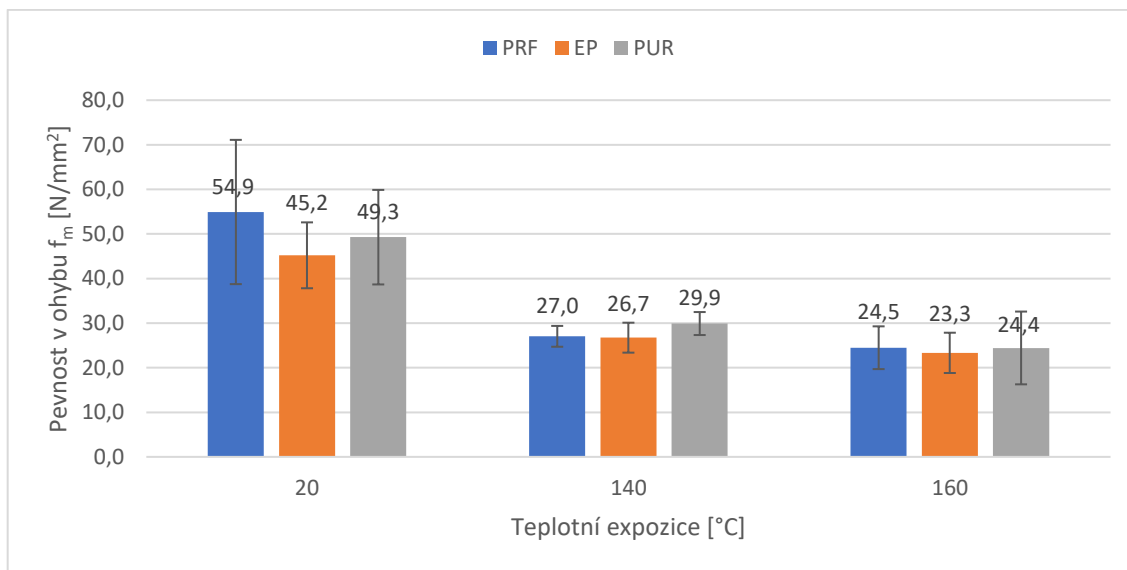
Tabulka 9) Průměrné hodnoty zkoušeného systému dřevo/FRP spojeného lepidlem Kestopur 1030.

Teplotní expozice [°C]	Polyuretanové lepidlo (PUR)					
	Pevnost v ohybu [N/mm ²]		Modul pružnosti [N/mm ²]		Kohezní porušení [%]	
	Průměrná hodnota f_m	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota $E_{m,g}$	Směrodatná odchylka	FRP výztuž	Dřevo
20	49,3	10,6	14,4	1,4	0	70
140	29,9	2,6	9,0	0,7	3	67
160	24,4	8,2	8,2	1,9	2	26

8.2. Vyhodnocení výsledků a diskuze

8.2.1. Pevnost v ohybu

V grafu č. 7 jsou vyhodnoceny průměrné hodnoty pevnosti v ohybu v závislosti na velikosti teplotní expozice. Zprůměrované hodnoty jsou tvořeny z celkem 27 měření, z čehož 3 vzorky tvořily sadu pro měření při jedné teplotní expozici a při použití jednoho druhu lepidla.



Graf 7) Grafické znázornění pevnosti v ohybu v závislosti na teplotní expozici.

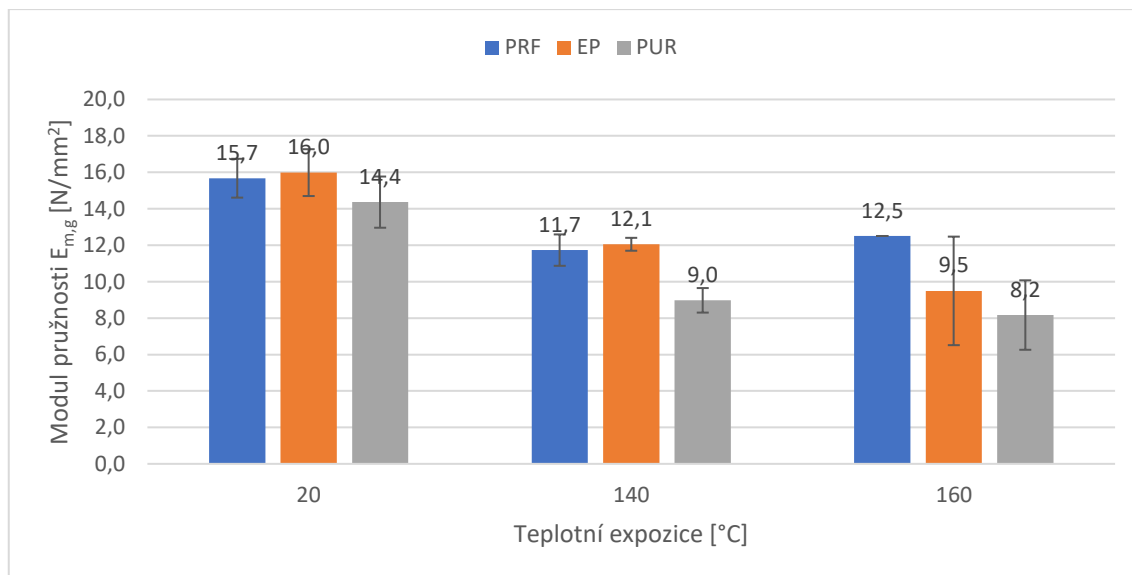
Z výsledků je patrné, že zvýšená teplotní expozice snižuje pevnostní vlastnosti vyztužených dřevěných prvků. Při zvětšující se teplotě klesá pevnost vyztužených prvků. Při teplotě 140 °C docházelo k poklesu pevností průměrně o 44 %, zatímco při teplotě 160 °C až o 51 %. Největších pevností v referenčním prostředí při 20 °C bylo dosaženo pro vzorek s použitím lepidla PRF systému, naopak nejnižších pevností bylo dosaženo u referenčních těles při použití epoxidového lepidla.

Příčinou snižujících se pevností v ohybu je bezpochyby kombinace termické degradace jak dřeva, tak i adheziva a FRP matrice. Termická degradace dřeva začíná nad 100 °C a s rostoucí teplotou dřevo dále ztrácí své pevnostní vlastnosti [20]. Dalším faktorem úbytku pevnosti je CFRP výztuž, jejíž epoxidová matrice dosahuje skelného přechodu již při 80 °C a za vyšších teplot dochází k delaminaci výztužného elementu [33]. Ovšem důležitým článkem prvku je samotný lepený spoj, který spojuje dřevěný adherend a uhlíkovou výztuž. Pokud má lepidlo nižší odolnost vůči zvýšeným teplotám než FRP

výztuž (tedy nižší teplotu skelného přechodu), dochází ke snížení pevnosti komponentu způsobené ovlivněním samotného vyztužení prvku.

8.2.2. Stanovení modulu pružnosti

Graf č. 8 obsahuje průměrné hodnoty modulu pružnosti. V grafu jsou dále vyznačeny směrodatné odchylky tvořené z celkem 27 vzorků.



Graf 8) Grafické znázornění modulu pružnosti v závislosti na teplotní expozici.

Dle výsledků je možné usoudit, že se zvyšující teplotou neklesá pouze pevnostní odolnost vyztužených dřevěných prvků, ale i jejich modul pružnosti. Čím vyšším teplotám je vzorek vystaven, tím méně odolává působícímu napětí. S ohledem na hodnoty tuhostí bylo dosaženo při referenční teplotě 20 °C relativně podobných hodnot modulů pružnosti, při teplotní zátěži vykázaly nejvyšších poklesů modulu pružnosti systému CFRP/dřevo za použití PUR lepidla (při 140 °C pokles o 37,5 % a při teplotě 160 °C o 43,0 %). Stejného trendu bylo dosaženo i u systémů lepených epoxidovým a formaldehydovým lepidlem.

Vzorky vystavené zvýšeným teplotám méně odolávají působícímu napětí vyvolané ohybovým zatížením. Stejně jako u stanovení pevnosti v ohybu je tento fakt způsoben teplotní degradací dřeva. Dřevo samo o sobě při vystavení zvýšených teplot ztrácí svou pevnost a s ní se nevyhnutelně snižuje i jeho tuhost a odolnost vůči namáhání [21].

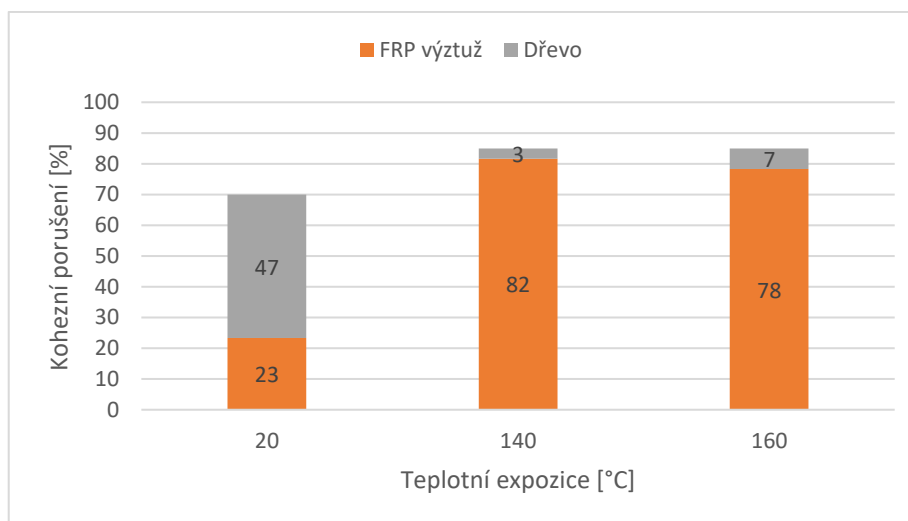
8.2.3. Stanovení kohezního porušení

Výsledky kohezního porušení jsou znázorněny v jednotlivých grafech rozdělených podle druhu použitého adheziva. V grafech jsou znázorněny zprůměrované procentuální kohezní porušení jednotlivých částí zkoušeného prvku. Hodnoty porušeného spoje FRP/dřevo po mechanickém namáhání byly stanoveny vizuálně.

- **Fenol–resorcin formaldehydové lepidlo (PRF)**

Zvýšená teplotní expozice měla u prvků s použitím fenol–resorcin formaldehydového lepidla výrazný vliv na kohezní porušení FRP výztuže. Již při 140 °C začala uhlíková výztuž s epoxidovou maticí vykazovat výraznou delaminaci (82 %) a podobného porušení nastalo i při teplotě 160 °C (78 %). Formaldehydové lepidlo naopak zvýšeným teplotám odolává za stálých hodnot porušení 15 %, ovšem došlo jen k nepatrnému porušení v dřevní části.

Můžeme tedy konstatovat, že fenol–resorcin formaldehydové lepidlo má schopnost odolávat zvýšeným teplotám. Dále je také patrné, že po vystavení vzorku zvýšeným teplotám došlo k teplotnímu rozpadu epoxidové matrice FRP výztuže. To značí, že FRP výztuž má menší teplotu skelného přechodu než použité fenol–resorcin formaldehydové lepidlo.



Graf 9) Grafické znázornění kohezního porušení v závislosti na teplotní expozici s použitím fenol–resorcin formaldehydového lepidla.

Na obrázku č. 22 je příklad jasně viditelného úplného porušení FRP výztuže (pro konkrétní typ lepeného systému odpovídá hodnotě kohezního porušení dřeva 5 % a CFRP lamely 85 %) spojené fenol–resorcin formaldehydovým lepidlem při 160 °C. Lepená

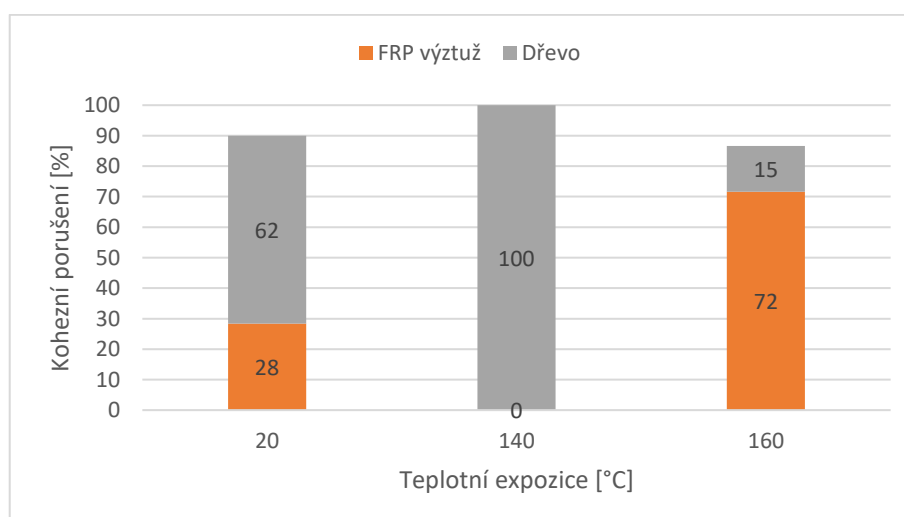
spára stejně jako dřevo téměř zcela odolala mechanickému zatížení (10 % porušení) a naopak došlo ke změknutí výztuže a následnému rozpojení polymerní části od její matrice.



Obrázek 22) Kohezní porušení dřeva (5 %) a CFRP lamely (85 %) spojené fenol–resorcin formaldehydovým lepidlem při působení teploty 160 °C.

- **Epoxidové lepidlo (EP)**

U systému dřevo/CFRP spojeném epoxidovým lepidlem nedošlo při 140 °C v lepené spáře a FRP výztuži k žádnému porušení. Celý lepený systém tak zůstal neporušen a teplotě zcela odolal. Při vystavení 160 °C se ovšem odolnosti vůči zvýšené teplotě snížily a nastal výrazný nárůst kohezního porušení ve CFRP výztuži (72 %) a nepatrnému poškození lepeného spoje (13 %).



Graf 10) Grafické znázornění kohezního porušení v závislosti na teplotní expozici s použitím epoxidového lepidla.

Vlivem teploty 160 °C na prvek s použitím epoxidového lepidla mělo za následek výrazné zeslabení CFRP výztuže (80 % kohezního porušení). I za zvýšených teplot lepidlo stále odolává s maximálním porušením do 10 % (viz obr. 23).

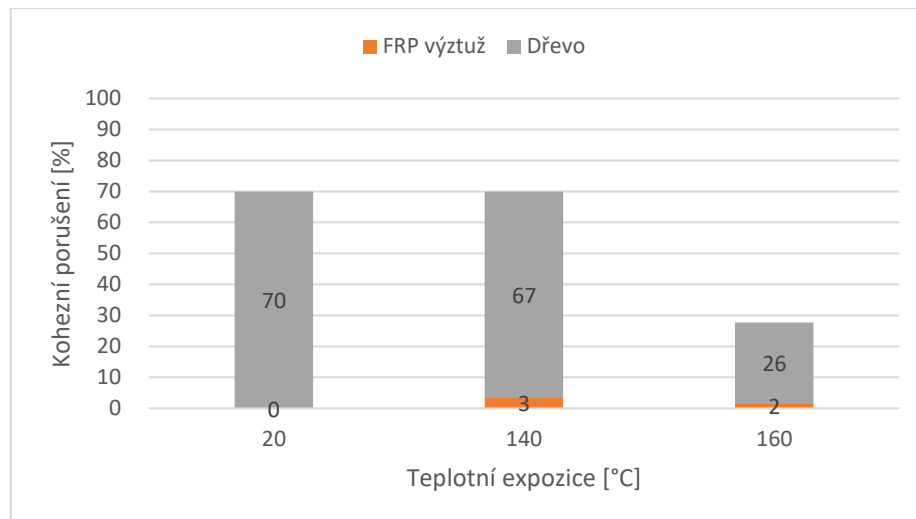


Obrázek 23) Kohezní porušení dřeva (10 %) a CFRP lamely (80 %) spojené epoxidovým lepidlem za působení zvýšené teploty 160 °C.

- **Polyuretanové lepidlo (PUR)**

U vzorků s polyuretanovým lepidlem docházelo již při 20 °C k velkému porušení dřevní části (70 %). Po vystavení teplotě 140 °C téměř nedošlo k žádným změnám porušení jednotlivých částí prvků. Ovšem za působení teploty 160 °C lepená spára začala vykazovat výrazné poškození (72 %).

I přes vysoké poškození lepeného spoje lze usoudit, že se polyuretanové lepidlo jeví jako lepidlo s vysokou teplotní odolností. Při teplotě 160 °C totiž došlo k velkému koheznímu porušení dřeva (26 %), což značí, že při této teplotě má polyuretanové lepidlo vysokou teplotní odolnost.



Graf 11) Grafické znázornění kohezního porušení v závislosti na teplotní expozici s použitím polyuretanového lepidla.

Obrázek č. 24 znázorňuje kohezní porušení dřeva (30 %) a FRP výztuže (5 %) spojené polyuretanovým lepidlem (porušení 65 %) za působení teploty 160 °C. Vlivem zvýšené teploty došlo ke snížení adhezivního účinku lepidla, a tedy ke zhoršení pojivých vlastností.



Obrázek 24) Kohezní porušení dřeva (30 %) a CFRP lamely (5 %) spojené polyuretanovým lepidlem při působení teploty 160 °C.

9. Závěr

V této práci jsem se zabýval teplotní odolností dřevěných prvků vyztužených externí CFRP výztuží lepené různými typy lepidel. Zkoumán byl lepený spoj a jeho odolnost vůči působení zvýšených teplot.

V teoretické části práce jsou popsány typy používaných konstrukčních lepidel pro dřevěné prvky a typy zesilujících FRP materiálů. Dále jsou popsány rešerše výsledků vědeckých studií, které se zabývaly problematikou teplotní odolnosti jednotlivých typů materiálu. Ze závěrů této rešerše byla navržena metodika testování teplotní odolnosti CFRP systémů, jež tvoří základ experimentální části práce.

Pro experiment bylo vybráno jako konstrukční prvek smrkové dřevo, které se následně vyztužilo externě lepenou CFRP výztuží ve formě lamel s epoxidovou matricí. Pro dostatečně pevný spoj byla vybrána lepidla splňující požadavky pro konstrukční účely, fenol – resorcin formaldehydové (PRF), epoxidové (EP) a polyuretanové (PUR). Zvýšená teplotní zátěž byla zvolena ve výši 20 °C, 140 °C a 160 °C po dobu trvání expozice prvků 120 minut. Případný vliv na odolnost lepeného zesíleného systému byl vyhodnocen komparací pevností v ohybu a stanovením kohezního porušení lepené spáry.

Výsledky měření prokázaly, že zvýšená teplotní expozice má dle předpokladu negativní dopad na pevnostní charakteristiku vyztužených dřevěných prvků. Již při 140 °C začalo docházet k výrazným poklesům pevností, a to průměrně o 44 %. Vzorky vystavené teplotě 160 °C prokazovaly pokles pevnosti v ohybu průměrně až o 51 %. Lze konstatovat, že u vyztužených dřevěných prvků jsou ohybové pevnosti pevně spjaty s modulem pružnosti, tedy se snižující se pevností klesá i tuhost a odolnost vůči teplotnímu namáhání vyvolané ohybovým zatížením.

Snížení pevností vlivem zvýšených teplot ovlivnily strukturu a vlastnosti použitých materiálů. U dřevěného adherendu při působení teplot nad 100 °C dochází k počátku procesu termické degradace a materiál postupně ztrácí svoje pevnostní vlastnosti. Pro vyztužení dřevěného prvku je ovšem podstatný lepený spoj. Je-li u lepidla teplota skelného přechodu nižší než u FRP výztuže, ztrácí vyztužení prvku zpevňující efekt. S ohledem na relativně obdobný pokles pevností při teplotních zátěžích je pro vyhodnocení neméně důležitým parametrem typ poškození lepeného spoje FRP/dřevo.

Při stanovení kohezního poškození byly hodnoty celkové koheze na rozhraní FRP/dřevo přibližně stejné, rozdíl nastal v místě kohezního poškození. Nejvyšších hodnot kohezního poškození FRP výztuže bylo dosaženo v systému s použitím PRF lepidla,

v případě kohezního poškození ve dřevě bylo dosaženo nejvyšších hodnot v systému při použití PUR lepidel. S uvažováním těchto výsledků lze konstatovat, že teplotní odolnost proti zvýšeným teplotám byla prokázána u všech použitých lepidel.

Citovaná literatura

1. **Tam, L., a další.** Understanding the effect of temperature on the interfacial behavior of CFRP-wood composite via molecular dynamics simulations. *Composites Part B: Engineering*. 15. leden 2017, Sv. 109, stránky 227-237.
2. **Firmo, J.P., a další.** Influence of elevated temperatures on epoxy adhesive used in CFRP strengthening systems for civil engineering applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 24. leden 2019.
3. **Fengel, D. a Wegener, G.** *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Mnichov : Walter de Gruyter, 1989.
4. **Požgaj, A., a další.** *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava : Bratislava : Príroda, 1993, 1993. ISBN 80-07-00600-1.
5. **Vavrčík, H. a Vávra, T.** *Anatomická stavba dřeva*. Brno, Česká republika : Ústav nauky o dřevě lesnické a dřevařské fakulty MZLU, 4. květen 2004.
6. **Vaněrek, J., a další.** *Kovové a dřevěné materiály*. Brno : Vysoké učení technické FAST, 2006.
7. **Vinter, V.** *Základy anatomie cévnatých rostlin*. [Online] Olomouc, Olomoucký kraj, Česká republika : Katedra botaniky PřF UP v Olomouci, 2006.
8. **Böhm, M. a Zeidler, A.** *Zajímavosti ze stavby dřeva - jak stavba dřeva ovlivňuje jeho vlastnosti*. [Online] Kostelec nad Černými lesy, Středočeský, Česká republika : Lesnická práce, 2018.
9. **Koželouh, B.** *Dřevěné konstrukce podle eurokódu 5, Step 1*. Zlín : autor neznámý, 1998. ISBN: 80-238-2620-4.
10. **Gubran, Š.** *Materiály 2 - Pomocné materiály*. Cheb : ISS Cheb Houslařská škola, 2007.
11. **Hrdlička, E.** *Rozdělení lepidel*. [online] Olomouc : Olomoucký kraj, 2015.
12. **ČSN EN 301: Fenolická a aminová lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Klasifikace a technické požadavky**. [Česká technická norma (ČSN)] Praha : Úřad pro technickou normalizaci, červen 2018. 83.180 - Lepidla.

13. **ČSN EN 16254+A1: Lepidla - Emulzní polymery síťované izokyanáty (EPI) pro nosné dřevěné konstrukce - Klasifikace a funkční charakteristiky.** [Česká technická norma (ČSN)] Praha : Česká technická norma (ČSN), říjen 2016. 83.180 - Lepidla.
14. **ČSN EN 15425: Lepidla - Jednosložková polyurethanová (PUR) lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Klasifikace a funkční požadavky.** [Česká technická norma (ČSN)] Praha : Česká technická norma (ČSN), srpen 2017. 83.180 - Lepidla.
15. **ČSN EN 12436: Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Kaseinová lepidla - Klasifikace a funkční požadavky.** [Česká technická norma (ČSN)] Praha : Česká technická norma (ČSN), 1. červenec 2002. 83.180 - Lepidla.
16. **Kompozitní výztuže.** [katalog] Brno : PREFA KOMPOZITY, a.s., 2015.
17. **Schober, K., a další.** FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*. 30. říjen 2015, Sv. 97, stránky 106–118.
18. **Sonnenschein, R., Gajdosova, K. a Holly, I.** FRP Composites and Their Using in the Construction of Bridges. *Procedia Engineering*. 2016, Sv. 161, stránky 477–482.
19. **Bodnárová, L.** *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2002. 8021422661 9788021422667.
20. **Kačíková, D., Netopilová, M. a Osvald, A.** *Drevo a jeho termická degradácia*. Ostrava : Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2006. 80-86634-78-7.
21. **Bekhta, P. a Niemz, P.** Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*. 2003, 57, stránky 39–546.
22. **MacLean, J. D.** Effect of steaming on the strength of wood. *American wood-preservers' association*. 1953, 49, stránky 88-112.
23. **Rusche, H.** Die thermische zersetzung von holz bei temperaturen bis 200°C. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 1973, 31, stránky 307-312.
24. **Huffmann, D. R.** High temperature drying effect on the bending strength of spruce-pine-fir joists. 1977, Sv. 3, 27, stránky 55-57.
25. **Teischinger, A.** Der einfluß des trocknungsverfahrens auf ausgewählte holzkennwerte. 1992, Sv. 2, 44, stránky 83-86.

26. **Simpson, I. a Haslett, A.** Comparison of the effect of drying at 120 °C or 70 °C on the properties of radiata pine. *4th international wood drying conference (IUFRO)*,. 1994.
27. **Sehlstedt-Persson, S. M. B.** High-temperature drying of scots pine. A comparison between HT- and LT-drying. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 1995, 53, stránky 95-99.
28. **Mitchell, R. L., Seborg, R. M. a Millett, M. A.** Effect of heat on the properties and chemical composition of douglas-fir wood and its major components. *Journal of FPRS*. November, 1953, stránky 38–42, 72–73.
29. **Seborg, R. M., Tarkow, H. a Stamm, A. J.** Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood. *Journal of FPRS*. September, 1953, stránky 59–67.
30. **Burmester, A.** Zur dimensionsstabilisierung von holz. *Holz als roh-und werkstoff*. 1975, 33, stránky 333–335.
31. **Giebeler, E.** Dimensionsstabilisierung von holz durch eine feuchte/wärme/druck-behandlung. *Holz als roh-und werkstoff*. 1983, 41, stránky 87–94.
32. **Lau, D., a další.** Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures. *Construction and Building Materials*. 2016, 126, stránky 573–585.
33. **Ferrier, E., Rabinovitch, O. a Michel, L.** Mechanical behavior of concrete–resin/adhesive–FRP structural assemblies under low and high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2016, 127, stránky 1017–1028.
34. **Yu, B. a Kodur, V.K.R.** Effect of high temperature on bond strength of near-surface mounted FRP reinforcement. *Composite Structures*. 2014, 110, stránky 88–97.
35. **Frihart, Ch. R.** Wood adhesion and adhesives. 2005, stránky 215-278.
36. **Rotafix.** *Principal repair methods* . 2005. str. 44, Prezentace .
37. **Horse Prestressed System** . [Online] Horse construction, 2020. <https://www.horseen.com/prestressed-FRP-System/prestressed-fiber-reinforced-polymer-laminat>.
38. **MC-DUR CFK-Lamellen E.** [Detail produktu] Plzeň : MC-Bauchemie - MC for infrastructure, industry & buildings.

39. *Laminated beam PRF system 1711/2520*. [Technický podklad] místo neznámé : Akzo Nobel, prosinec 2016.
40. *Epolam 2017*. [Technický podklad] Most : Axson Technologies, říjen 2013.
41. *Kestopur 1030*. [Technický podklad] místo neznámé : Kiilto, září 2009.
42. *ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. [Norma] Praha : Česká technická norma (ČSN), 2009.
43. **Lokaj, A., Vavrusova, K. a Mikolasek, D.** Analysis of behavior and carrying capacity of glued timber - timber joints loaded with bending moment. *Procedia Engineering*. 2017, 190, stránky 263 – 270.
44. *ČSN ISO 10365 - Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. [Norma] Praha : Česká technická norma (ČSN), září 1995. Česká technická norma (ČSN). 83.180 - Lepidla.