



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE, MECHANIZACE A ŘÍZENÍ STAVEB

INSTITUTE OF TECHNOLOGY, MECHANIZATION AND CONSTRUCTION MANAGEMENT

ADHEZE LEPENÝCH SPOJŮ FASÁDNÍCH OBKLADŮ Z MATERIÁLŮ NA BÁZI DŘEVA

ADHESION OF ADHESIVE JOINTS FOR FACADE APPLICATIONS MADE OF WOOD-BASED MATERIALS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. et Ing. Barbora Nečasová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Barbora Kovářová, Ph.D.

BRNO 2018

Abstract

The presented dissertation is focused on investigating the adhesive properties of façade cladding made of wood and wood-based materials in combination with flexible adhesion/assembly systems. These systems allow the implementation of effective construction joints and provide a solution with uniform stress distribution which allows the transfer of heavy loads, while simultaneously reducing the weight of the entire structure, which is also often connected with substantial cost reductions. Despite all that, little attention has been paid to this area so far. It is not a solution which is properly embodied in technical standards or in designers', architects' and contractors' awarenesses.

The aim of this dissertation is to characterise adhesive properties of selected façade cladding representatives made of wood and wood-based materials for the purposes of bonded joint application in a ventilated façade system. To define adhesion of façade joints, numerical and experimental methods are used, taking also various limit conditions into account. The main conclusion of the dissertation is the characterisation of basic parameters which influence adhesion, effectiveness and quality of façade adhesive joints. The secondary conclusion is the compilation of a simple methodical procedure for testing and implementing façade glued joints. The dissertation also makes a contribution by extending the current state of knowledge of façade glued joints.

Keywords

Adhesion; Adhesive; Adhesive properties; Bond; Cohesion; Cohesive properties; Façade; Glue; Joint; Putty; Sealant; Shear; Tensile;

Rukopis disertační práce je uložen v Knihovnickém informačním centru Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

© Barbora Nečasová, 2018

PŘEDMLUVA

Lepené spoje se v posledních dekádách staly v mnoha odvětvích průmyslu rovnocennou alternativou tradičního mechanického spojování, oblast stavebnictví nevyjímaje. Vysokopevnostní pružné lepicí/montážní systémy umožňují realizaci efektivních konstrukčních spojů, nabízející řešení s rovnoměrným rozložením napětí umožňující přenos i velkých zatížení za současného snížení hmotnosti celé konstrukce, s čímž mnohdy souvisí i značné snížení finančních nákladů. Polymerová povaha používaných lepidel také významně přispívá k vyšší odolnosti vůči vibracím a nárazům, které ovlivňují životnost a únavovou pevnost. Mezi další výhody patří i vysoká flexibilita lepených spojů, jež umožňuje eliminaci deformací vznikajících při spojování materiálů s rozdílnou teplotní nebo vlhkostní roztažností. Uvedené široké možnosti využití, dle mého názoru, lepené spoje přímo předurčují k použití pro upevnění fasádního obkladu.

Přesto této oblasti byla doposud věnována velice malá pozornost. Od certifikace a instalace prvního fasádního systému s lepeným kotvením uběhly sice již dvě dekády (první realizace byla provedena v roce 1997 v Německu), ale doposud se nejedná o řešení, které by bylo řádně zakotveno v technických normách, či v povědomí projektantů, architektů a zhotovitelů. Domnívám se, že nedůvěra v tuto technologii pramení především z nedostatku informací v normativních ustanoveních a odborné literatuře, což následně zavdává i příčinu ke vzniku pochybností souvisejících s použitelností, životností či únosností lepených spojů v kombinaci s vybraným materiálem fasádního obkladu. Spektrum v současné době na trhu dostupných materiálů fasádních obkladů tuto situaci nijak neusnadňuje.

Tyto skutečnosti definují cíl předkládané práce. Podle mého názoru je vhodné této oblasti věnovat větší pozornost a například sestavení jednoduché metodiky by přispělo k rozšíření problematiky lepených spojů ve stavební praxi. Tak jak je tomu například v oblasti leteckého či automobilového průmyslu. Definice základních postupů vedoucích k charakterizaci elementárních vlastností pružných fasádních systémů tvoří podstatu práce.

V práci se zaměřuji na popis zkušebních metod vhodných pro stanovení základních materiálových charakteristik lepených fasádních sestav, jejichž výstupy usnadní predikci chování lepeného fasádního spoje. Práce také diskutuje některé aspekty modelování pružných spojů metodou konečných prvků.

OBSAH

| | | |
|-----------|--|---------------|
| 1. | Úvod do problematiky | - 5 - |
| 1.1. | Koncept provětrávaných fasádních systémů..... | - 6 - |
| 1.2. | Teorie adheze a lepení | - 8 - |
| 2. | Cíl disertační práce | - 10 - |
| 3. | Metody zpracování práce | - 11 - |
| 3.1. | Rešerše..... | - 11 - |
| 3.2. | Analýza..... | - 11 - |
| 3.3. | Simulace a syntéza..... | - 11 - |
| 3.4. | Doporučení a závěr | - 12 - |
| 4. | Návrh zkušební metodiky | - 13 - |
| 4.1. | Metodika stanovení fyzikálně - mechanických vlastností lepených sestav ... | - 13 - |
| 4.2. | Metodika optimalizace velikosti fasádního obkladu | - 19 - |
| 4.3. | Metodika ověření odolnosti fasádních segmentů plošným zatěžováním | - 20 - |
| 4.4. | Metodika nestandardních zkušebních postupů..... | - 22 - |
| 5. | Analýza výsledku a souhrnné zhodnocení | - 24 - |
| 5.1. | Stanovení fyzikálně - mechanických vlastností lepených sestav..... | - 24 - |
| 5.2. | Stanovení optimální velikosti fasádního obkladu..... | - 28 - |
| 5.3. | Stanovení odolnosti fasádních segmentů metodou plošného zatěžování | - 29 - |
| 5.4. | Stanovení vlivu nestandardních zkušebních postupů..... | - 31 - |
| 6. | Závěry a přínos práce | - 34 - |
| | Seznam použité literatury | - 36 - |
| | Informace o autorovi | - 39 - |

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Obvodovým pláštěm budov je v současnosti věnována značná pozornost. Zejména z architektonického a estetického hlediska. Návrh a provedení fasády má podstatný vliv na vnímání budovy okolím. Někteří autoři rádi uvádějí, že fasáda utváří tvář objektu [1]-[6],[7] a nejsou daleko od pravdy, vždyť původ výrazu fasáda vychází z francouzského označení pro tvář či vzhled [8],[9]. Ačkoliv je fasáda klíčovým elementem při pohledu na budovu z venku, její návrh a provedení současně působí i na její vnitřní prostředí a uživatelský komfort [1]. Mezi hlavní faktory ovlivňující výběr fasádního systému patří například výhled z objektu, rozsah a způsob denního osvětlení interiéru, náročnost údržby objektu v průběhu jeho užívání a v neposlední řadě i zatížení nosné konstrukce fasádním systémem. Snad právě proto se stala velice populárním systémem provětrávaná fasáda.

Termínem provětrávaná fasáda jsou označovány tzv. studené fasády, které fungují na principu průběžné vzduchové mezery mezi fasádním obkladem a nosnou stěnou objektu. Jedná se o vícevrstvý stěnový systém, v němž je ochranná protidešťová vrstva oddělena od ochranné protivětrivé vrstvy větranou mezerou [1]. Vnitřní plášť fasády, stěna objektu, má za úkol plnit požadavky statické, tepelně – technické a akustické. Vnější plášť pak vytváří ochrannou bariéru před povětrnostními vlivy, ale hlavně plní funkci estetickou [1],[7]. Vysoká variabilita provedení návrhu druhu opláštění umožňuje jeho použití jak u novostaveb, tak i v případě rekonstrukcí a oprav stávajících objektů.

Může se zdát, že systém provětrávané fasády je poměrně novým konceptem 20. století. Avšak dle dostupných informací se jedná o technologii, která se vyvíjela současně s rozvojem stavebnictví, je používána již po několik století [2],[4],[10]-[13]. Místo původu je přisuzováno především Norsku, kde byl používán fasádní systém nazývaný *the open-jointed barn technique*¹. Jak již název napovídá, systém byl instalován převážně na hospodářských objektech, ilustrativní příklad je uveden na obrázku č. 1 - A. Dřevěné opláštění bylo připevněno k nosnému roštu, taktéž dřevěnému, což dovolilo vznik otevřené mezery mezi samotným opláštěním a stěnou budovy. Průběžná a provětrávaná mezera umožňovala bezproblémový odvod par a případně i dešťové vody, která se za opláštění dostala.

Vědecký výzkum, v současném slova smyslu, zaměřený na studium chování a stanovení základních charakteristik provětrávaných fasád má své počátky ve 40. letech minulého století. Velice rychle bylo zjištěno, že tato technika v mnoha ohledech předčí doposud známé postupy. Koncem 50. let již systém provětrávané fasády zcela pronikl do širšího povědomí stavebnictví i vědeckého světa [10]-[13] a do konce 80. let se stal notně

¹ Volně přeloženo jako metoda s otevřenými spoji.

využívanou variantou fasádního opláštění. V současnosti jsou výhody tohoto systému skloňovány v souvislosti s měnícím se podnebím, globálním oteplováním a jeho pozitivním vlivem na vnitřní pohodu staveb [11]-[12],[14]-[16]. Do dnešního dne bylo zpracováno nepřehledné množství studií a vědeckých publikací, jež se přímo orientují na výzkum související s touto problematikou [17]-[18].



Obrázek č. 1 – Dřevěný fasádní obklad: A – open-joint barn technique v Gammelstads Kyrkstad; B - rodinný dům s fasádním obkladem ze sibiřského modřínu; C – bytové domy s obkladem z modřínových šindelů;

1.1. Koncept provětrávaných fasádních systémů

Systém provětrávané fasády je vícevrstvý, kdy každá individuální vrstva plní jinou funkci. Směrem od interiéru budovy se nosná konstrukce fasádního opláštění montuje na nosný podklad, například zděnou stěnu budovy. Tato nosná konstrukce fasádního obkladu se velice často nazývá fasádní rošt. Nejčastější materiálové provedení roštu je z oceli, hliníku nebo dřeva a důraz je kladen především na nízkou váhu prvků. Rošt může být v provedení jednosměrném nebo dvousměrném, z profilů různých průřezových charakteristik a délek. Nosný rošt může být k nosnému podkladu upevněn přímo nebo je možné jej vynášet pomocí systémových konzol. Mezi nosné profily je vkládána tepelná izolace. Při výběru jejím je kladen důraz především na tvarovou stálost a nehořlavost. Následuje vrstva průběžně provětrávané vzduchové mezery, která je podstatou celého systému. Její návrh, provedení a funkčnost jsou zásadní pro fasádní systém. Je vhodné, aby tato mezera byla široká alespoň 40 mm, avšak tento rozměr je povětšinou dostatečný pouze pro pláště rodinných domů. U budov vyšších je nezbytné zpracování individuálního posouzení [15]. Mezi provětrávanou a izolační vrstvou je vhodné vkládat protivětrnou vrstvu, která zabrání případné degradaci tepelné izolace. Poslední vrstvou je vnější plášť fasády tvořený fasádním obkladem. V současnosti lze vybírat ze široké nabídky materiálů s různými vlastnostmi, v celé škále barev. Výběr nejčastěji provádí architekt. Vhodné použití materiálů významně ovlivňují jejich užitné vlastnosti – odolnost vůči povětrnostním podmínkám, odolnost vůči nárazu apod. [19].

Koncept dizajnu obvodového pláště je dle Puškár a kol. součástí požadavků kladených na architektonické dílo [1]. Patří mezi ně především požadavky právní, sociální,

finanční a technické. Jednotlivé oblasti se navzájem prolínají. Není možné naplnit podstatu jedné skupiny, aniž bychom nepřihlédli k nárokům ostatních zásad. Architektonická a estetická kritéria, jež v případě provětrávaných fasádních systémů představují zásadní oblast, jsou součástí požadavků technických. Jak uvádí Puškár a kol.: “ *Člověk ve všech epochách a kulturách věnoval nevyčerpatelnou energii tomu, aby vytvořil něco krásného.* “ [1]. Přesto, je-li prováděna montáž provětrávané fasády na existujících objektech se zajímavými architektonickými detaily, návrh tohoto typu obvodového pláště zcela jistě nepozvedne estetickou hodnotu objektu, spíše naopak. Jak již bylo zmíněno v úvodu, architektonické ztvárnění fasády ovlivňuje nejen její vnímání okolím, ale mělo by být v souladu s funkčním řešením interiéru, tzv. užitnou pohodou. Hlavním vyjadřovacím prostředkem při zpracování návrhu je barevnost a geometrie. Zatímco u objektů pro bydlení jsou doporučovány barvy přírodní a méně jasné [15], v případě komerčních objektů je vhodné použití kontrastních barev a materiálů s vysokým leskem, či transparentních prvků [1]. S volbou barvy a materiálu obkladu úzce souvisí i povrchová úprava prvků. Neméně důležitá je prostorová forma, tj. tvar a velikost fasádního obkladu. Velkoformátové obklady působí scelujícím dojmem a dokáží vytvořit iluzi, kdy objekt působí méně mohutně, naopak malé formáty plochu opticky zvětšují [15],[19].

V současné době je výběr vhodného materiálu fasádního opláštění poměrně obtížný. Nabídka je velmi široká, téměř nevyčerpatelná, ve snaze uspokojit finanční a sociální požadavky všech investorů. Nejedna autor [1]-[4],[15],[19]-[21] ovšem souhlasí se skutečností, že v historii stavebnictví existuje nepříliš mnoho materiálů, které by byly ještě dnes, tak jako dřevo, používány ke zcela identickým účelům. V současné době se dřevěné obklady opět těší velké oblibě a stejně jako před 300 lety jsou jedním z nejvyužívanějších typů fasádního obkladu, což dokazuje, že se nejedná o dočasný módní trend reagující na povinnost navrhovat budovy z udržitelných materiálových zdrojů. Dřevin používaných na fasádní obklady je celá škála. Lišit se mohou kresbou, strukturou, barvou nebo kvalitou, dále také tvarem [22]-[25], viz příklady na obrázku č. 1.

Stejně jako v případě různých materiálových variant fasádního opláštění i volba upevňovacích prvků obkladu dnes není pouze otázkou vhodného technického řešení, i v této oblasti je důraz kladen na požadavky estetické. Upevňovací prvky můžeme dělit na přiznané a skryté, dále na mechanické a lepené. V případě mechanického spoje se jedná o staletími prověřenou metodu kotvení fasádního obkladu. Nejběžnější jsou prvky přiznané, tedy viditelné, jedná se o hřebíky, vruty, šrouby, nýty, háčky apod. V poslední době se staly oblíbenými také prvky skrytého mechanického kotvení. Také v případě lepených spojů hovoříme o systému skrytého kotvení. Aplikuje se z rubové strany obkladu. Zde existuje poměrně velké omezení limitované vhodným výběrem montážních systémů, tj. fasádních

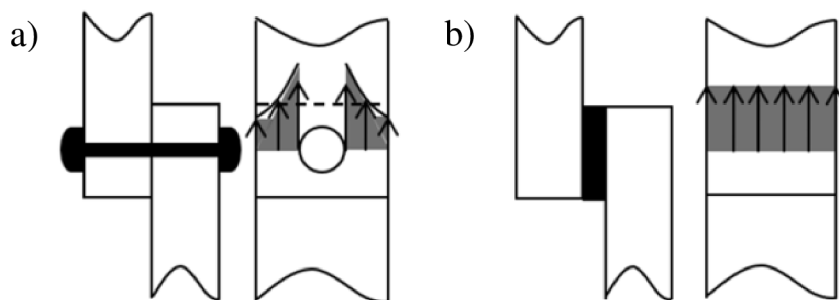
lepidel. Významnou roli hrají také adhezní vlastnosti lepených povrchů, nosné podkonstrukce a fasádního obkladu, které přímo ovlivňují kvalitu a životnost konstrukčního spoje.

1.2. Teorie adheze a lepení

Adheze, jak již název této práce napovídá, úzce souvisí s řešenou problematikou, a proto i definování a pochopení tohoto termínu je pro řešení zkoumané oblasti výzkumu nezbytné. Zde se ovšem nachází první úskalí. Mnoho autorů zabývajících se problematikou lepení se shoduje [26]-[34], že definovat výraz *adheze*, takovým způsobem, který by vyhověl požadavkům všech zainteresovaných vědních oblastí, tj. mechanika, fyzika a chemie, je zcela nemožné. Jedná se o fenomén založený na hledání mezioborových souvislostí.

Z etymologického hlediska je předpokládáno, že termín adheze má původ v období středověku a vychází z latinského slova *adhaesiō*. Volný překlad znamená spojení, napojení či připojení [35]. Českým ekvivalentem výrazu adheze je přídržnost. Z tohoto pohledu je tedy možné adhezi pokládat za vlastnost, již není možné zkoumat bez provedení spojení dvou a více předmětů vedoucí k vytvoření jedné nové věci či tělesa. Tuto teorii podporuje i definice adheze uvedená v technické normě ČSN EN 923², jež uvádí, že adheze je vlastnost lepeného povrchu, která většinou v čase narůstá z důvodu postupujícího smáčení adherendu, s čímž souvisí i adhezní pevnost lepeného povrchu, kterou představuje síla, již je nutné vynaložit pro oddělení lepidla od druhého povrchu [36].

Problematika lepení provází lidstvo po celou jeho historii. K největšímu rozvoji v této oblasti došlo v druhé polovině 20. století. Zatímco do začátku 20. století byla všechna doposud používaná lepidla zcela na přírodní bázi, s koncem průmyslové revoluce přišlo i první lepidlo na bázi syntetických polymerů. Dnes je pro nás téměř nemožné, najít produkt běžně užívaný v domácnostech, v průmyslu, v dopravě, či kdekoli jinde, který by v nějaké (jakékoliv) formě neobsahoval lepidlo.



Obrázek č. 2 – Porovnání rozložení napětí ve spoji – a) spoj mechanický, b) spoj lepený [27],[37];

² ČSN EN 923 – Lepidla: Termíny a definice.

S rozvojem výzkumu a výroby lepidel na bázi polymerů se rozšiřovaly i oblasti jejich použití. V současnosti jsou lepené spoje v mnoha odvětvích průmyslu stále častější alternativou spojů mechanických. Jejich předností jsou zejména rychlost a jednoduchost instalace, trvanlivost a odolnost nebo nižší nároky na strojní techniku. Lepené spoje poskytují řešení s rovnoměrným rozložením napětí ve spoji, viz příklad na obrázku č. 2, což následně umožňuje zvýšení tuhosti konstrukce a přenosu i velkých zatížení, [26]-[34],[37].

Velmi pozitivním přínosem je také snížení hmotnosti celé konstrukce fasádního pláště, zároveň umožňují snížení finančních nákladů. Polymerová povaha používaných lepidel také do jisté míry zajišťuje tlumení vibrací a nárazů, které ovlivňují životnost a únavovou pevnost spojů. Mezi další výhody patří i vysoká flexibilita lepených spojů, jež umožňuje eliminaci deformací vznikajících při spojování materiálů s rozdílnou teplotní nebo vlhkostní roztažností. Adheze materiálů nesouvisí pouze s adhezními vlastnostmi lepeného povrchu, ale jedná se i o odolnost tohoto povrchu vůči působení mechanického zatížení [38].

Pevnost a životnost vzniknuvšího spoje je nejčastěji ovlivněna čtyřmi základními parametry [33]:

- *Adhezními vlastnostmi lepených povrchů;*
- *Adhezí, přilnavostí, lepidla k lepenému povrchu;*
- *Kohezí, soudržností, lepidla;*
- *Pevností lepených materiálů, neboť lepený spoj je tak silný, jak jsou odolné lepené plochy.*

2. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Kladné vlastnosti lepených spojů je dle mého názoru přímo předurčují k upevnění fasádního obkladu. I přes nesporné výhody, oblasti fasádních lepených spojů byla doposud věnována velice malá pozornost. Od certifikace a instalace prvního fasádního systému s lepeným kotvením uběhly již dvě dekády, první realizace byla provedena v roce 1997 v Německu [39], a ani dnes se nejedná o řešení, které by bylo řádně zakotveno v technických normách, či v povědomí architektů, projektantů nebo zhotovitelů.

Domnívám se, že nedůvěra v tuto technologii pramení právě z nedostatku informací, ať už v normativních ustanoveních nebo v odborné literatuře. Tyto skutečnosti zavdávají příčinu ke vzniku pochybností souvisejících s použitelností, životností či únosností lepených spojů v kombinaci s vybraným materiálem fasádního obkladu. Spektrum v současné době na trhu dostupných fasádních obkladů situaci nijak neusnadňuje. S nadsázkou je možné konstatovat, že téměř každý den je na trh uveden nový materiál s odlišnými fyzikálně - mechanickými vlastnostmi. Avšak i malý rozdíl materiálových charakteristik může diametrálně ovlivnit adhezní vlastnosti lepených povrchů, které jsou podstatou funkčnosti celého systému. V současnosti je pozornost stále více upínána k materiálům, při jejichž výrobě jsou využívány obnovitelné zdroje nebo reziduální odpad, což také komplikuje predikci jejich vhodnosti k lepení.

Tato skutečnost definuje cíl předkládané disertační práce. Podle mého názoru je vhodné této oblasti věnovat větší pozornost. Například sestavení jednoduché metodiky pro ověření fyzikálně - mechanických vlastností lepeného fasádního spoje by přispělo k rozšíření v praxi.

Cílem experimentální části této disertační práce je definovat adhezní vlastnosti vybraných zástupců fasádních obkladů ze dřeva a na bázi dřeva pro účely aplikace lepeného spoje. **Hlavním cílem předložené práce je na základě provedených zkoušek definovat základní parametry, které ovlivňují adhezi, účinnost a kvalitu lepených fasádních spojů. Sekundárním cílem je sestavení jednoduchého metodického postupu pro zkoušení a implementaci lepených fasádních spojů.**

Hlavního cíle bude dosaženo za pomoci dat získaných z dílčích cílů, jimiž jsou:

- Návrh vhodné geometrie zkušebních vzorků;
- Návrh zkušebního zařízení pro stanovení adheze lepeného spoje a definování okrajových podmínek zkoušení;
- Stanovení vlivu smáčivosti povrchu na adhezní vlastnosti lepených povrchů;
- Stanovení vlivu lepicího systému na účinnost lepeného spoje;

- Stanovení vlivu materiálu fasádního obkladu na účinnost lepeného spoje;
- Stanovení vlivu umělého stárnutí, tzv. kondicionování, na účinnost lepeného spoje;
- Stanovení vlivu přirozeného stárnutí na účinnost lepeného spoje;
- Stanovení vlivu technologické nekázně při instalaci systému na účinnost lepeného spoje;
- Stanovení vlivu materiálových vlastností prvků lepené sestavy na návrh maximálních možných rozměrů fasádního obkladu;
- Stanovení odolnosti lepeného spoje proti účinkům působení větru;

V práci se prioritně zaměřuji na popis základních kroků spojených se zkoušením fasádních lepených sestav cílených na stanovení základních materiálových charakteristik, jejichž výstupy usnadní predikci adhezních vlastností lepených ploch a chování lepeného fasádního spoje. Práce také diskutuje některé aspekty modelování pružných spojů metodou konečných prvků za pomoci výpočetní techniky.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE

Cílem metodiky zpracování disertační práce je především vymezení základních kroků, jež usnadní dosažení definovaných cílů.

3.1. Rešerše

Zpracování přehledu dosavadního stavu poznání řešené vědní oblasti. Analýza a syntéza vybraných poznatků, jejichž výstupem je stručný úvod do současného stavu poznání řešené problematiky.

3.2. Analýza

Analýza navazuje na předchozí krok, vychází z jeho závěrů a její výstupy jsou podstatné pro experimentální část výzkumu. Především se jedná o analýzu faktorů ovlivňujících kvalitu lepených spojů a výběr vhodných zkušebních metod.

3.3. Simulace a syntéza

Jedná se o zásadní kapitolu disertační práce. Přímo navazuje na poznatky současného stavu poznání řešené problematiky. Navrhuje postup řešení a prakticky implementuje zjištěná fakta.

Cílem syntézy je vyhodnocení naměřených dat a jejich posouzení, porovnání výsledků s předpokládanými výstupy, stanovení závěrů zkoušek a kritické zhodnocení

zvolených postupů. Experimentální výzkum je rozdělen do několika etap a jejich vyhodnocení je provedeno vždy před započítáním etapy následující, neboť tato vychází z jejich závěrů.

Experimentální výzkum tvoří podstatu disertační práce a je rozdělen do tří hlavních etap:

- **ETAPA I.:** Metodika stanovení fyzikálně - mechanických vlastností lepených sestav
- **ETAPA II.:** Metodika optimalizace velikosti fasádního obkladu pomocí numerického modelu metodou MKP
- **ETAPA III.:** Metodika ověření odolnosti lepených fasádních segmentů metodou plošného zatěžování

V úvodní fázi výzkumu, tj. v etapě I., bude proveden výběr vstupních surovin pro vytvoření lepených sestav a vhodných standardizovaných zkušebních metod. Vzhledem k nutnosti analyzovat i vliv povětrnostních podmínek, bude zpracován návrh a optimalizace vhodného zařízení. Následně bude proveden návrh geometrie zkušebních vzorků, u kterých budou sledovány především fyzikálně - mechanické charakteristiky a změny adhezních vlastností.

Po analýze a vyhodnocení získaných výsledků adhezních a fyzikálně - mechanických vlastností bude v rámci druhé etapy sestaven numerický model ve výpočetním softwaru pro stanovení optimální velikosti fasádního obkladu. V modelu budou zohledněny jak naměřené materiálové charakteristiky lepených sestav, tak i okrajové podmínky, jimž je lepený fasádní spoj v reálném prostředí vystaven. Jedná se o kombinaci zatížení vlastní vahou, vlivu teplotní a vlhkostní roztažnosti a zatížení větrem.

V závěrečné třetí etapě bude provedeno ověření chování konstrukčních dílců lepených fasádních sestav metodou plošném zatěžování, tzv. vakuováním. Celkovým závěrem bude nejenom stanovení odolnosti lepeného segmentu vůči vyvozenému zatížení, ale i posouzení vlivu adhezních vlastností na účinnost celého lepeného fasádního systému.

3.4. Doporučení a závěr

Závěr disertační práce bude věnován kritickému zhodnocení všech etap experimentální části, definici jednoznačných závěrů, doporučení pro praktické využití zjištěných poznatků a popisu možného zaměření budoucího vědeckého výzkumu v řešené problematice, případně i definice dílčích cílů. V neposlední řadě bude zhodnocen přínos poznatků disertační práce pro stavební praxi a pro akademickou obec.

4. NÁVRH ZKUŠEBNÍ METODIKY

Návrh zkušebních postupů je nezbytný pro dosažení výše definovaných cílů a vždy předchází samotnému experimentálnímu ověřování požadovaných vlastností. V případě lepených spojů je vhodné provést hned několik typů ověření. Kromě definice fyzikálně - mechanických vlastností každého z použitých materiálů, je důležité zjistit vlastnosti lepených sestav, jež jsou kombinací vybraných materiálů.

4.1. ETAPA I. - Metodika stanovení fyzikálně - mechanických vlastností lepených sestav

Pro provedení laboratorních měření jsem na základě doporučení vybraných zkušebních metod definovala geometrii zkušebních vzorků a jejich počet. Za účelem porovnání výstupních dat prováděných zkoušek jsem zvolila různé fasádní obklady z materiálů na bázi dřeva a také různé montážní/lepící systémy.

Tuto etapu jsem rozdělila na dílčí výzkumné kroky, které jsou zaměřeny na:

- Výběr vhodných materiálů a identifikaci základních materiálových charakteristik;
- Výběr zkušebních metod a sestavení metodického postupu zkoušení;
- Návrh a výrobu zkušebních vzorků;
- Testování zkušebních vzorků;
- Vyhodnocení výsledků měření.

Již v úvodu práce uvádím, že fasáda dává stavbě *tvář* a utváří její *charakter*. Proto bylo důležité již v počátku výzkumu provést výběr vhodného materiálu a definovat jeho materiálové charakteristiky. Rozumný výběr se nevztahuje pouze k volbě materiálu opláštění. Nevhodně zvolená kombinace všech materiálů fasádního systému může mít za následek významné snížení životnosti konstrukce a podstatné navýšení finančních nákladů na její průběžnou údržbu. Volba materiálů pro účely této práce byla značně zjednodušena, neboť jsem se zaměřila pouze na materiály ze dřeva a/nebo na bázi dřeva. Důraz jsem také kladla na nenáročnou údržbu fasádního obkladu.

Následujícím krokem je volba vhodných zkušebních metod, jejichž výstupy jsou relevantní pro zvolený typ konstrukce. Za účelem stanovení základních fyzikálně - mechanických vlastností vybraných lepených sestav jsem adaptovala dvě zkušební metody. Pro stanovení adheze, tedy přídržnosti jednotlivých vrstev sestavy, jsem použila zkušební metodu, jež je používána ke stanovení přídržnosti povrchové úpravy k podkladu [40]. Jedná se o metodu jejíž postup je definován technickou normou

ČSN 73 2577. Druhou metodou, jejíž výstupy mají na návrh fasády podstatnější vliv, je zkouška stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav, jejíž postup je popsán v technické normě ČSN EN 1465 [41]. Fasády jsou v přirozeném prostředí vystaveny vlivům povětrnostních podmínek, proto jsem pozornost věnovala i výběru metod, které tyto vlivy simulují. Vybrala jsem zkoušku mrazuvzdornosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí dle ČSN 73 2579 [42] a zkoušku odolnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí proti náhlým teplotním změnám dle ČSN 73 2581 [43]. Domnívám se, že vybrané metody kondicionování vhodně substituují cykly reálného prostředí.

4.1.1. Výběr materiálu

Na základě výše uvedené motivace jsem vybrala tři typy obkladových materiálů. Prvním zvoleným materiálem je cementotřísková deska, známá pod komerčním označením Cetris, konkrétně Cetris Basic (dále v textu také pouze Cetris). Druhým vybraným materiálem je fasádní obklad ze sibiřského modřínu (*Larix sibirica*), jenž patří pro svoji vysokou odolnost, dobře odolává povětrnostním vlivům, a životnost mezi nejvyhledávanější dřeviny pro fasádní aplikace. Vybrala jsem dvě varianty fasádního opláštění ze sibiřského modřínu. Jednak tradiční řešení opláštění fasádními palubkami, jako druhou variantu ryze dřevěného obkladu jsem vybrala masivní třívrstvé křížem lepené desky. Jedná se o velkoformátový fasádní obklad, jenž je často používán v Rakousku či Švýcarsku [21], v České republice sporadicky. Posledním zkoušeným materiálem je opět zástupce kompozitů. Jedná se o kompozit dřeva a plastu, tzv. dřevoplast, který je známý pod zkratkou WPC³. Dřevoplast (dále v textu také WPC) je unikátní alternativa dřevěného obkladu, která kombinuje tradiční vzhled dřeva s odolností a pružností kompozitu [28],[32],[44].

Stejně jako v případě volby obkladového materiálu i při výběru nosné podkonstrukce fasády jsem kladla důraz na výběr přírodního materiálu vhodného k tomuto účelu. Vybrala jsem konstrukční hranoly KVH ze smrkového dřeva. Všechny použité hranoly byly třídy pevnosti C24. Relevantní materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Při volbě montážního systému byla jedním z hlavních kritérií nenáročnost jeho aplikace. Proto jsem vybrala pouze systémy s jednosložkovým lepidlem. Tímto způsobem jsem vyloučila nutnost míchání hmoty dle daného poměru a eliminovala možnost pochybení při realizaci. Každý ze zvolených montážních systémů sestává z několika komponent, které společně zaručují jeho účinnost. Jedná se o lepidlo, aktivační nátěr (čisticí přípravek), zlepšovací nátěr (dále v textu také primer) a montážní pásku. Sekundárním kritériem výběru

³ WPC zkratka slovního spoje Wood – plastic – composite.

vhodného montážního systému byla jeho vhodnost použití v kombinaci se dřevem nebo materiály na bázi dřeva, což bylo výrobcem zaručeno u všech vybraných systémů.

Tabulka č. 1 – Materiálové charakteristiky vybraných materiálů [44]- [47]

| Materiál | Objemová hmotnost⁴ [kg/m ³] | Lineární roztažnost⁵ [mm/m] | Délková teplotní roztažnost⁶ α [10 ⁻⁶ K ⁻¹] |
|------------------------|--|--|---|
| Cetris Basic | 1 275 | 2,88 | 8,51 |
| Fasádní palubky | 573 | 1,1 ⁷ /15,9 ⁸ | 4,47/23,49 |
| Třívrstvá lepená deska | 640 | 4,16 | 6,61 |
| WPC | 1 250 | 1,6 | 12,9 |
| Nosná podkonstrukce | 410 | 0,5 | 5,0 |

První skupina zvolených lepidel jsou zástupci elastických polyuretanových lepidel vytvrzujících vzdušnou vlhkostí. Jedná se o lepicí systémy určené přímo k lepení fasádních obkladů. Mezi vybranými lepidly je systém SikaTack® Panel (dále v textu také Sika) od firmy Sika CZ, s.r.o., jenž byl před cca 20 lety prvním certifikovaným systémem určeným k lepení fasádního obkladu [39]. Druhým montážním systémem je Dinitrol F500LP Polyflex (dále v textu také Dinitrol) od výrobce Dinol GmbH.

Druhou vybranou skupinou jsou zástupci modifikovaných polymerů. V této skupině jsou opět dva reprezentanti, oba od stejného výrobce, avšak pouze jeden z nich je určen k lepení fasádních systémů. Jedná se o lepicí systém Simson PanelTack HM (dále v textu také Simson HM), který je na český trh dodáván pouze na vyžádání. Jedná se o systém určený pro lepení dřeva a materiálů na bázi dřeva. V současné době není známa žádná realizace fasádního opláštění na území České republiky s tímto systémem. Dále byl vybrán systém s lepidlem Simson 007 SMP (dále v textu také Simson 007). Jedná se o lepidlo běžně dostupné na českém trhu, které ovšem není primárně určeno k lepení fasádních obkladů. Jedná se o univerzální konstrukční lepidlo, jež může být použito nejenom na různé druhy materiálů, ale i jako tmel k vyplnění spár a nerovností povrchů. Základní materiálové charakteristiky zkoušených zástupců jsou uvedeny v tabulce č. 2.

⁴ Hodnotu objemové hmotnosti jsem u všech zkoušených obkladových materiálů stanovila experimentálně.

⁵ Hodnotu lineární roztažnosti při změně vlhkosti vzduchu z 20 % na 100 %. Hodnotu lineární roztažnosti při změně vlhkosti vzduchu jsem u všech zkoušených obkladových materiálů stanovila experimentálně.

⁶ Koeficient délkové teplotní roztažnosti α . Hodnotu koeficientu délkové teplotní roztažnosti jsem u všech zkoušených obkladových materiálů stanovila experimentálně.

⁷ Lineární roztažnost při změně vlhkosti vzduchu fasádní palubky II s vláknem.

⁸ Lineární roztažnost při změně vlhkosti vzduchu fasádní palubky \perp k vláknům.

Tabulka č. 2 – Základní materiálové charakteristiky lepidel [48]-[51]

| Vlastnost | Hodnota | | | |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | SikaTack® Panel | Dinitrol F500LP Polyflex | Simson 007 SMP | Simson PanelTack HM |
| Objemová hmotnost | 1 180 kg/m ³ | 1 200 kg/m ³ | 1 450 kg/m ³ | 1 500 kg/m ³ |
| Pevnost v tahu | 2,50 N/mm ² | 9,00 N/mm ² | 2,30 N/mm ² | 1,80 N/mm ² |
| Pevnost ve smyku | 2,00 N/mm ² | 5,50 N/mm ² | N/A ⁹ | 2,25 N/mm ² |

4.1.2. Příprava zkušebních vzorků

Geometrii zkušebního vzorku pro zkoušení přídržnosti lepeného spoje při tahovém namáhání jsem navrhla dle doporučení uvedených v ČSN 73 2577¹⁰ s mírnou modifikací formátu obkladového materiálu. Vzorek tvoří vždy dva prvky, vybraný fasádní obklad a nosná podkonstrukce. Obklad jsem upravila na rozměr destičky čtvercového tvaru o délce strany $l/b = 100$ mm, nikoliv 200 mm, jak je doporučeno technickou normou [40]. Podstatnou modifikací bylo nutné provést v případě nosné podkonstrukce, kterou by dle výše uvedené normy měl představovat terč kruhového průřezu o celkové ploše $A_{ef} = 2\,500$ mm². Ve fázi příprav jsem zjistila, že výroba terčů ze dřeva je velmi časově náročná a stanovených rozměrů není možné dosáhnout se 100 % přesnosti. Proto jsem použila prvky čtvercového průřezu o délce stran $l_{ef} = 50$ mm, požadavek na velikost lepené plochy A_{ef} jsem tedy dodržela. Tento tvar dle mého názoru i vhodněji substituuje skutečný tvar podkonstrukce.

Geometrii zkušebního vzorku pro stanovení pevnosti spoje ve smyku jsem navrhla dle doporučení uvedených v ČSN EN 1465¹¹, zde nebylo nutné provádět žádné modifikace. Zkušební tělesa jsem vyrobila opět ze dvou prvků, jeden prvek představoval nosnou podkonstrukci a druhý fasádní obklad, oba o rozměrech $b/b_{ef} = 25$ mm a $l_1/l_2 = 100$ mm [41]. Délku přeplátování spoje jsem volila také na základě doporučení technické normy $l_{ef} = (12,5 \pm 0,25)$ mm.

Lepené spoje mohou být mnohdy použity i tam, kde by to nebylo možné pro tradiční techniky spojování a současně tento spoj nabízí unikátní kombinaci vysoké pevnost, životnosti a možnosti se přizpůsobit daným podmínkám [27]. Proto je nesmírně důležité lepené plochy před samotnou aplikací lepidla připravit tak, aby byly zmíněné výhody využity co nejefektivněji. Před přistoupením k výrobě zkušebních vzorků bylo nezbytné zjistit, zda je povrch vybraných materiálů dostatečně smáčivý, či zda bude nutné přistoupit k provedení

⁹ Vlastním měřením na materiálu s vysokou pevností byla zjištěna hodnota cca 2,00 N/mm².

¹⁰ ČSN 73 2577: Zkouška přídržnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí k podkladu.

¹¹ ČSN EN 1465: Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav.

úpravy povrchu lepené plochy. U všech vybraných materiálů fasádního obkladu jsem za tímto účelem provedla jednoduchý test smáčivosti dle pokynů ČSN EN 828¹².

Následně jsem všechny zkušební vzorky, tj. 18 ks tzv. lepených sestav, vyrobila dle pokynů uvedených v technických listech výrobců montážních systémů ze stejné šarže materiálu. Po dobu 14 dní jsem vzorky ponechala v suchém a čistém prostředí při teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a vlhkosti $(55 \pm 10) \%$. Byly vystaveny tzv. statickému vyzrávání. V případě skutečných realizací se vždy jedná o zrání dynamické [52]-[53]. Poté jsem proto dvě sady vzorků kondicionovala. Zbylých 6 vzorků jsem i nadále ponechala ve standardním prostředí po dobu dalších 14 dní a až poté přistoupila k jejich zkoušení. Naměřené hodnoty slouží jako referenční pro posouzení vlivu vybraných metod kondicionování.

Podstata první vybrané metody kondicionování, tzv. simulace náhlých teplotních změn, jež je definována technickou normou ČSN 73 2581¹³, tkví ve střídavém zahřívání vzorků na teplotu $(70 \pm 3) ^\circ\text{C}$ a jejich následném ochlazení ve vodní lázni na teplotu $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ v 25 cyklech [43]. Druhá metoda kondicionování, simulace mrazuvzdornosti definovaná ČSN 73 2579¹⁴, spočívá ve střídavém zmrazování zkušebních vzorků v mrazícím prostoru o teplotě $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ po dobu 18 hodin a rozmrazování ve vodní lázni o teplotě $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ po dobu 6 hodin v 15 cyklech [42]. Po provedení požadovaných cyklů jsem vzorky ponechala v čistém standardním prostředí po dobu 7 dní. Předpokládá se jejich kompletní vysušení. Vzorky jsem po celou dobu cyklování monitorovala a vizuálně kontrolovala, zda nedochází k jejich porušení. Vizuální kontrolu je vhodné provést i před přistoupením k samotnému zkoušení, neboť při jejich vysychání může docházet k výskytu poruch.

Experimentální měření jsem prováděla ve zkušebně Ústavu stavebního zkušebnictví na Fakultě stavební v Brně. Použila jsem mechanický lis Heckert FP 10/1, který umožňuje pořízení záznamu o průběhu deformací zkušebního tělesa v závislosti na působícím zatížení v čase. Rychlost zatěžování jsem volila dle doporučení zkušebních norem na hodnotu 1 mm/min. Zkoušení probíhalo při teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti prostředí $(50 \pm 20) \%$.

4.1.3. Metodika vyhodnocení výsledků

Je velice nepravděpodobné, že by se v souboru dat získaných z jednotlivých měření neobjevily hodnoty, které jsou výrazně odlišné. Domnívám se, že nejdříve je vhodné

¹² ČSN EN 828: Lepidla – Smáčivost – Stanovení měřením kontaktního úhlu a volné povrchové energie pevného povrchu.

¹³ ČSN 73 2581. Zkouška odolnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí proti náhlým teplotním změnám.

¹⁴ ČSN 73 2579. Zkouška mrazuvzdornosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí.

zpracovat statistické posouzení naměřených hodnot a následně přistoupit k jejich detailní analýze. Posuzovaný výběrový soubor vždy tvoří hodnoty naměřené síly při porušení lepeného spoje. Posouzení jsem provedla mimo jiné pomocí Grubbsova testu [52]. Přednost této metody spočívá v možnosti použití i pro malou skupinu hodnot.

Po ukončení tahových zkoušek jsem všechny zkušební vzorky vizuálně prohlédla a fotograficky zdokumentovala za účelem stanovení způsob jejich porušení. Způsob porušení, tzv. *failure mode*¹⁵, je definován jednak kvalitou provedení stykových ploch adheřendů, jejich geometrií a také způsobem a rychlostí zatěžování. Pro pochopení adhezních vlastností lepených ploch je popis způsobu porušení nezbytný, neboť i při stejných podmínkách zkoušení může docházet ke zcela odlišným typům poškození. Za tímto účelem jsem sestavila hodnotící škálu zahrnující 7 různých typů způsobu porušení, která by byla aplikovatelná na všechny zkoušené obkladové materiály. Jedná se o stupnici, která zohledňuje jednak doporučení normy ČSN ISO 10365¹⁶ a také doporučení mezinárodní technické normy ASTM D 5573¹⁷.

Na základě doporučení uvedených v technické normě pro zkoušení pevnosti lepené sestavy ve smyku, ČSN EN 1465, jsem u všech zkušebních vzorků stanovila napětí na lepené ploše naměřené při jejich porušení dle vztahu (4.1).

$$\sigma_{adh} = \tau = \frac{F_{max}}{A_{ef}} = \frac{F_{max}}{(b_{ef} \times l_{ef})}, \quad (4.1)$$

kde σ_{adh}/τ je přídržnost/napětí na smykové ploše lepené sestavy při tahovém namáhání v N/mm², F_{max} je tahová síla zaznamenaná při porušení lepené sestavy v N, A_{ef} je plocha lepeného spoje v mm², b_{ef} je šířka lepeného spoje v mm a l_{ef} je délka lepeného spoje v mm.

Jedním z výstupů provedených měření byla také hodnota maximálního prodloužení lepeného spoje při porušení. Z naměřených hodnot jsem mohla definovat deformaci lepeného spoje, která je charakterizována jeho protažením [56], resp. protažením lepidla ve spoji, dle vztahu (4.2) pro stanovení poměrného přetvoření ε .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \quad (4.2)$$

kde ε je relativní (poměrné) prodloužení, Δl je přírůstek délky lepeného spoje vyvolaný tahovým namáháním v mm, l_0 je počáteční délka lepeného spoje v mm a l_1 je délka lepeného spoje při porušení v mm.

¹⁵ Zavedený mezinárodně užívaný anglický výraz pro označení způsobu porušení.

¹⁶ ČSN ISO 10365: Lepidla – Označení hlavních typů porušení lepeného spoje [54].

¹⁷ Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints [55].

4.2. ETAPA II. – Metodika optimalizace velikosti fasádního obkladu pomocí numerického modelu metodou MKP

Etapa navazuje na etapu I. „Metodika stanovení fyzikálně - mechanických vlastností lepených sestav“. V etapě II. jsem si dala za cíl zpracovat návrh optimální velikosti fasádního obkladu.

K dosažení výše uvedeného cíle vedou dílčí výzkumné kroky, které jsou zaměřeny na:

- Stanovení tuhosti lepeného spoje, tj. podpory;
- Stanovení hodnoty 5% dolního a 95% horního kvantilu náhodné veličiny vypočítané z průměrné tuhosti podpor;
- Stanovení odolnosti lepených sestav při tahovém namáhání;
- Stanovení hodnoty tlaku větru působícího na vnější povrch simulovaného objektu;
- Sestavení numerického modelu ve výpočetním softwaru Nexis32;
- Návrh optimální velikosti fasádního obkladu.

Je nesporné, že každému uvedení nového produktu na trh, resp. doporučením vhodnosti použití vybraného montážního systému v kombinaci s konkrétním fasádním obkladem, by mělo vždy předcházet experimentální ověření stupně použitelnosti, jak uvádí i Liška [16]. Efektivita použití lepeného spoje může být značně ovlivněna materiálovými charakteristikami vybraného fasádního obkladu nebo nosné podkonstrukce, jak bylo nastíněno v etapě I.

Účinnost a životnost lepeného fasádního kotvení můžeme zvýšit a prodloužit například optimalizací velikosti fasádního obkladu. Při zpracování návrhu rozměrů obkladových prvků je vhodné vzít v úvahu vliv působení zatížení od vlastní tíhy, větru a vlhkostní a teplotní roztažností, tedy objemových změn použitého materiálu, což také doporučují vybrané technické normy a kódy [57],[59],[61]. Dle mého názoru je při návrhu lepeného spoje důležité zohlednit také jeho celkovou poddajnost a tuhost. Mezi velikostí obkladu a tuhostí podpor, zde lepeného spoje, platí vztah nepřímé úměry. To znamená, že čím větší je tuhost podpory, tím menší velikost obkladu může být v návrhu použita.

V úvodní části druhé etapy se zabývám metodikou výpočtu tuhosti lepeného spoje pro vybranou kombinaci materiálů dle vztahu (4.3). Ze vztahu (4.3) je zřejmé, že v případě řešené konstrukce je tuhost podpory možné definovat jako Youngův modul pružnosti.

$$k = \frac{\frac{F_{max}}{A_{ef}}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{\sigma_{adh}(\tau)}{\varepsilon} = E \quad (4.3)$$

kde k je tuhost podpory v tahu v N/mm^2 , E je Youngův modul pružnosti v N/mm^2 , F_{max} je tahová síla zaznamenaná při porušení lepené sestavy v N , A_{ef} je plocha lepeného spoje v mm^2 , Δl je přírůstek délky lepeného spoje vyvolaný tahovým namáháním v mm , l_0 je počáteční délka lepeného spoje v mm , σ_{adh}/τ je přidržnost/napětí na smykové ploše lepené sestavy při tahovém namáhání v N/mm^2 a ε relativní prodloužení [61].

Dále bylo nezbytné doplnit chybějící materiálové charakteristiky fasádních obkladů, konkrétně se jedná o vliv vlhkosti a teploty na objemové změny, a vypočítat velikost zatížení větrem w_e v N/m^2 , které působí na fasádu simulovaného objektu. Výstupy úvodních dílčích kroků druhé etapy jsem použila pro definici okrajových podmínek při tvorbě modelu konstrukce typického fasádního segmentu v softwaru Nexis32, jehož prostřednictvím jsem zjistila parametry namáhání lepeného spoje. Výpočtové hodnoty, tj. průběh vnitřních sil, velikost deformací a hodnoty reakcí při statické analýze sledované konstrukce, mi sloužili jako podklad pro závěrečnou optimalizaci velikosti fasádního obkladu. Výstupem etapy II. je návrh vhodné velikosti fasádního obkladu z vybraného materiálu.

4.3. ETAPA III. – Metodika ověření odolnosti lepených fasádních segmentů plošným zatěžováním

Hlavním cílem etapy III. je ověření skutečného chování konstrukčních dílců lepených fasádních sestav a verifikace adhezních vlastností lepeného spoje při zatížení větrem, resp. při zatížení negativními tlaky. Řešení etapy vychází ze závěrů zjištěných v etapě I. a II.

Tuto etapu jsem opět rozdělila na dílčí výzkumné kroky, které jsou zaměřeny na:

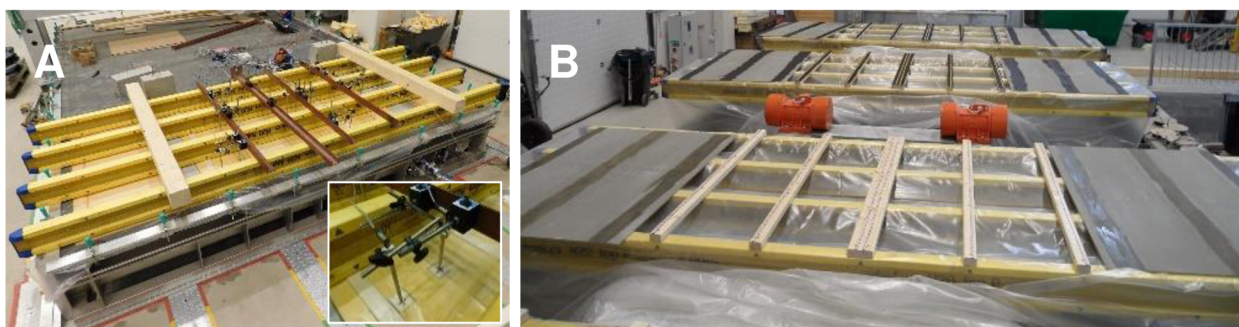
- Výběr vhodných materiálů;
- Výběr zkušební metody;
- Návrh a výrobu zkušebních segmentů;
- Testování zkušebních segmentů;
- Vyhodnocení výsledků měření.

Na základě výstupů etapy I. jsem v etapě III. opět vybrala vhodné kombinace materiálů pro zkoušení odolnosti lepeného segmentu proti zatížení větrem. Nevhodné fasádní obklady či montážní systémy jsem vyřadila. V druhém kroku této etapy jsem se zaměřila na výběr vhodné zkušební metody, na základě jejíchž požadavků jsem vytvořila návrh geometrie zkušebního fasádního segmentu. Rozhodla jsem se vycházet z potřeb zkušebního

postupu definovaného technickou směrnicí ETAG 034¹⁸. V návrhu jsem také zohlednila i výstupy numerické analýzy, jež je součástí etapy II., a požadavky používaného zkušebního zařízení. Výstupem etapy III. je stanovení odolnosti fasádního segmentu proti působení sání. Vedlejšími výstupy je hodnota odolnosti a prodloužení lepeného spoje při porušení, definice způsobu porušení a vlivu adhezních vlastností vybraných materiálů na způsob porušení nebo vliv montážní pásky na pevnost spoje při porušení.

4.3.1. Příprava a zkoušení fasádního segmentu

Všechny fasádní segmenty se skládají z primárního materiálu (fasádní obklad (zde deska Cetris Basic, třívrstvá lepená deska a fasádní palubky ze sibiřského modřínu); lepený spoj a nosná podkonstrukce (zde konstrukční hranoly KVH pevnostní třídy C24 ze smrkového dřeva)) a sekundárního materiálu (vynášecí konstrukce (zde bednicí nosník Doka H20 top N dl. 4,90 m); PE fólie umožňující vznik podtlaku; spojovací materiál (tj. vruty do dřeva) a extrudovaný polystyren)). Prvky segmentu jsou patrné na obrázku č. 3 – B. S cílem ověřit a porovnat výhody a nevýhody lepeného fasádního spoje jsem vyrobila i zkušební segmenty s tradičním mechanickým upevněním fasádního obkladu.



Obrázek č. 3 – A – zkušební fasádní segment uložený ve zkušební komoře; B – proces výroby zkušebního segmentu;

Pro všechny zkoušené varianty fasádních systémů jsem sestavila zkušební tělesa o stejné geometrii, neboť jedině tak je možné získat data vhodná k vzájemnému srovnání. Experimentální měření jsem prováděla ve zkušebně výzkumného centra AdMaS v Brně na ulici Purkyňova. Použila jsem vzduchotěsnou komoru určenou pro horizontální plošné zatěžování konstrukčních prvků. Zkoušku postupným zatěžováním jsem ukončila v okamžiku, kdy bylo dosaženo plošného zatížení 3 000 N/m² v případě panelů s fasádním obkladem Cetris Basic a zatížení 6 000 N/m² v kombinaci s dřevěným fasádním obkladem. Tuto hladinu zatížení jsem definovala na základě výstupů etapy I. Od této úrovně byly fasádní

¹⁸ ETAG 034:2012: European Technical Approval Guideline 034:2012 - Kits for External Wall Claddings [57]-[58].

segmenty zatěžovány kontinuálně se zvyšujícím se plošným zatěžováním bez přestávek až do jejich porušení.

4.4. Metodika nestandardních zkušebních postupů

Všeobecně lze konstatovat, že pro laboratorní zkušební postupy je důležitá definice a kontrola okrajových podmínek prostředí, díky čemuž jsme schopni dané experimenty opakovat. Avšak v reálném prostředí je uplatnění těchto kroků neproveditelné. Ať už se jedná o působení reálných povětrnostních vlivů nebo o dodržování technologických postupů, jednotlivé aplikace a měření se vždy budou lišit.

4.4.1. Posouzení vlivu reálného prostředí

Již v průběhu testování zkušebních vzorků během etapy I. jsem zaznamenala, že zvolené zkušební metody zcela nereflektují působení reálného prostředí. Rozhodla jsem se přistoupit k nestandardnímu řešení zkoušení lepených spojů v reálném prostředí. Na základě výstupů etapy I. jsem sestavila zkušební panely pouze v kombinaci s montážními systémy přímo určenými pro lepení fasádních obkladů a s fasádním obkladem ze sibiřského modřínu a WPC. Panely vybraných kombinací zkoušených materiálů jsem uložila v reálném prostředí na střeše objektu. Jedná se o stavbu jejíž parametry sloužili k definici okrajových podmínek simulovaného objektu v etapě II. Jak montážní páska, tak i lepidla, byla stejně jako fasádní obklad a nosná podkonstrukce vystaveny vlivům venkovního prostředí. Panely byly orientovány na jih a uloženy pod úhlem cca 60°. Po dobu 3 let, tzn. v období od 06/2015 – 06/2018, jsem monitorovala změny vzhledu lícové vrstvy fasádního obkladu vlivem přirozeného stárnutí. Dále jsem prováděla pravidelné kontroly a monitoring výskytu poruch.

Po třech letech jsem zkušební panely rozřezala na zkušební vzorky a pomocí zařízení definovaného v kapitole 4.1.2 stanovila přídržnost lepených sestav dle vztahu (4.1) a hodnotu poměrného prodloužení dle vztahu (4.2). Dále jsem posoudila způsob porušení zkušebních vzorků.

4.4.2. Posouzení vlivu technologické nekázně

V předchozích kapitolách jsem se několikrát zmínila o vysokých nárocích na dodržování technologické kázně při aplikaci montážního fasádního systému. Dodržování některých kroků bylo komplikované i v laboratorním prostředí. Z praxe vím, že v reálné situaci je přístup k respektování těchto postupů více liknavý, což mě vedlo k otázce: „Do jaké míry má nedodržení technologických postupů vliv na adhezi lepeného spoje?“.

Za tímto účelem jsem zpracovala stručnou případovou studii. Na základě výstupů etapy I. jsem se rozhodla vliv technologické nekázně studovat pouze u fasádního obkladu ze sibiřského modřínu, konkrétně u fasádních palubek, v kombinaci s montážním systémem SikaTack® Panel. Technologická nekázeň spočívá v nedodržení technologického postupu při realizaci spoje doporučeného daným výrobcem lepicího systému.

Vybrala jsem několik typů technologické nekázně, které dle mého názoru mohou nastat i v reálné situaci:

- Nekázeň T01: Vyzrávání lepených sestav za nízkých teplot.
- Nekázeň T02: Aplikace zlepšovacího nátěru na vlhký substrát.
- Nekázeň T03: Aplikace lepidla na dvojitou vrstvu zlepšovacího nátěru.
- Nekázeň T04: Aplikace lepidla na vlhký zlepšovací nátěr.
- Nekázeň T05: Aplikace lepidla na substrát bez použití zlepšovacího nátěru.

Vyjma lepených sestav s technologickou nekázní ozn. T01 jsem všechny vzorky vyrobila a po dobu 14 dní ponechala v laboratoři ve standardním prostředí, tzn. při teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti prostředí $(55 \pm 10) \%$. S cílem posoudit adhezní vlastnosti lepených sestav při nedodržení pokynů k aplikaci montážních systémů jsem zvolila stejné zkušební metody i postupy vyhodnocování výsledků jako v etapě I.

5. ANALÝZA VÝSLEDKU A SOUHRNNÉ ZHODNOCENÍ

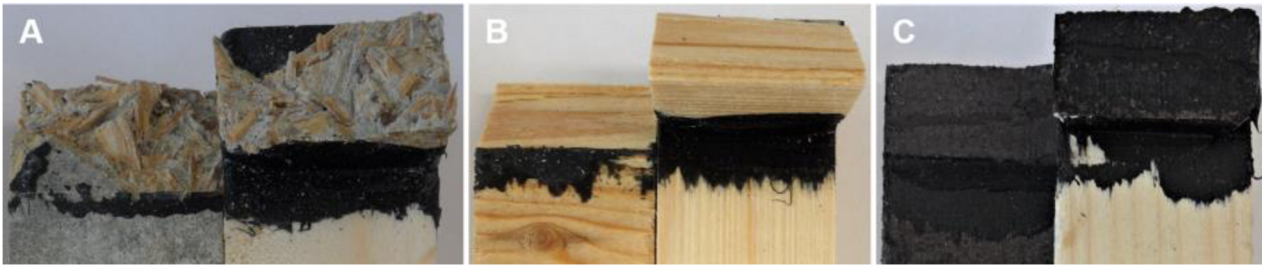
Analýza výstupů zkoušek a jejich souhrnné zhodnocení by mělo vést ke komplexnímu posouzení vhodnosti použitých postupů. S cílem ověřit adhezi lepených spojů fasádních obkladů z materiálů na bázi dřeva jsem metodiku této práce rozdělila na tři hlavní etapy.

5.1. ETAPA I. - Stanovení fyzikálně - mechanických vlastností lepených sestav

V první etapě jsem se zabývala stanovením fyzikálně - mechanických vlastností lepených sestav vyrobených z kombinací různých materiálů. Vybrala jsem dva typy zcela odlišných kompozitů, přesto oba obsahují více jak 50 % dřevěné složky, a materiály ze dřeva. Charakterizaci adhezních vlastností jsem provedla prostřednictvím testu smáčivosti lepených povrchů, posouzení způsobu porušení lepených sestav a pomocí dvou běžně užívaných tahových zkoušek. Vybrané zkušební metody poskytují informaci o velikosti napětí, jemuž může spoj odolávat, než dojde k jeho porušení.

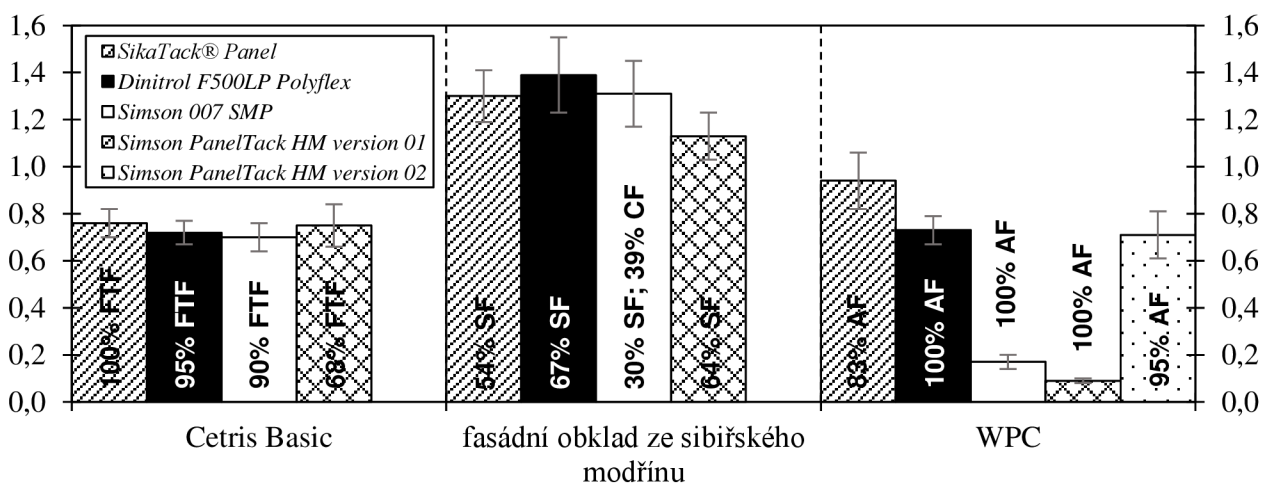
Nejčastějším způsobem porušení lepené sestavy v kombinaci s fasádním obkladem Cetris bylo porušení s označením FTF¹⁹, viz obrázek č. 4 – A. Tento způsob jsem zaznamenala u 83 % zkoušených sestav. Jedná se o poruchu, při níž je téměř celá plocha lepeného spoje vytržena z vnější vrstvy fasádního obkladu. Příčinou vytržení je dosažení maximální pevnosti materiálu v ploše desky, zde cca 0,63 N/mm². Tato porucha je příznivá, neboť dokazuje, že zvolené materiály jsou kompatibilní. Způsob porušení zkušebních vzorků s obkladem ze sibiřského modřínu byl více rozmanitý než v případě kombinace s obkladem Cetris. V cca 63 % měření došlo k poškození adherendu podkonstrukce. Dle mého názoru je tato kombinace materiálů také kompatibilní, neboť k adheznímu porušení spoje docházelo zcela výjimečně. Naopak v kombinaci s WPC obkladem jsem u 95 % zkoušených sestav monitorovala adhezní způsob porušení, který nasvědčuje tomu, že vybrané materiály nejsou za zkoušených podmínek slučitelné. Výsledky zaznamenané v kombinaci se systémy Sika, Dinitrol a Simson HM, viz obrázek č. 5, po úpravě povrchu ovšem naznačují, že podrobnější zkoumání fyzikálně - chemických vlastností povrchu tohoto materiálu, zcela jistě může vést ke zlepšení adhezních vlastností a kompatibilitě s montážními systémy.

¹⁹ FTF – Fiber–Tear Failure – vytržení lepeného spoje z fasádního obkladu.



Obrázek č. 4 – Posouzení způsobu porušení: A – FTF – vytržení lepeného spoje z obkladu; B – SF – porušení adherendu (zde fasádní obklad); C – AF – adhezni porušení v mikrovrstvě primeru a WPC obkladu;

Závěry porovnání pevnosti lepených sestav při tahovém namáhání, uvedené na obrázku č. 5, demonstrují, že pokud by zvolené kombinace materiálů byly posuzovány pouze na základě hodnoty přídržnosti a síly zaznamenané při jejich porušení, lepené sestavy s obkladem Cetris Basic by byly kompatibilní ve všech zkoušených variantách. Ačkoliv bylo dosaženo menších pevností spoje než například v kombinaci s dřevěným obkladem, vždy došlo k porušení obkladu, průměrně v 88 % měření, a nikoliv spoje. Poměrně malé hodnoty směrodatné odchylky ukazují na malý rozptyl chyb měření. Ve variantě s obkladem ze sibiřského modřínu jsou naměřené pevnosti lepených sestav také srovnatelné, ovšem ve všech případech jsem zaznamenala větší odchylky ve výsledcích jednotlivých měření. Jak uvádím výše, příčinou širšího rozptylu výsledných hodnot je patrně způsob porušení lepeného spoje, který byl více rozmanitý než u obkladu Cetris a výsledné pevnosti tak byly také mnohem rozdílnější.

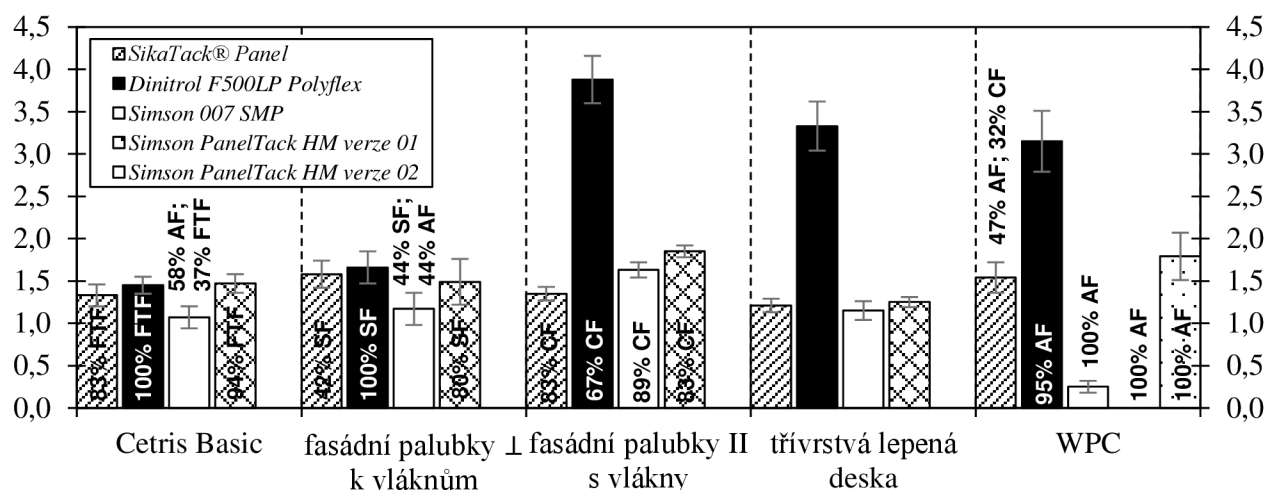


Obrázek č. 5 - Porovnání průměrných přídržností lepených sestav při tahovém namáhání v N/mm^2 a převažujících způsobů porušení (AF – adhezni porušení; CF – kohezni porušení; FTF – vytržení obkladu a SF – porušení substrátu)

Stanovení přídržnosti lepených sestav při tahovém namáhání je důležité především pro zjištění stupně kompatibility zvolených materiálů, pro stanovení možného způsobu porušení a pro výpočet stanovení vlivu zatížení konstrukce větrem. Pro návrh optimální

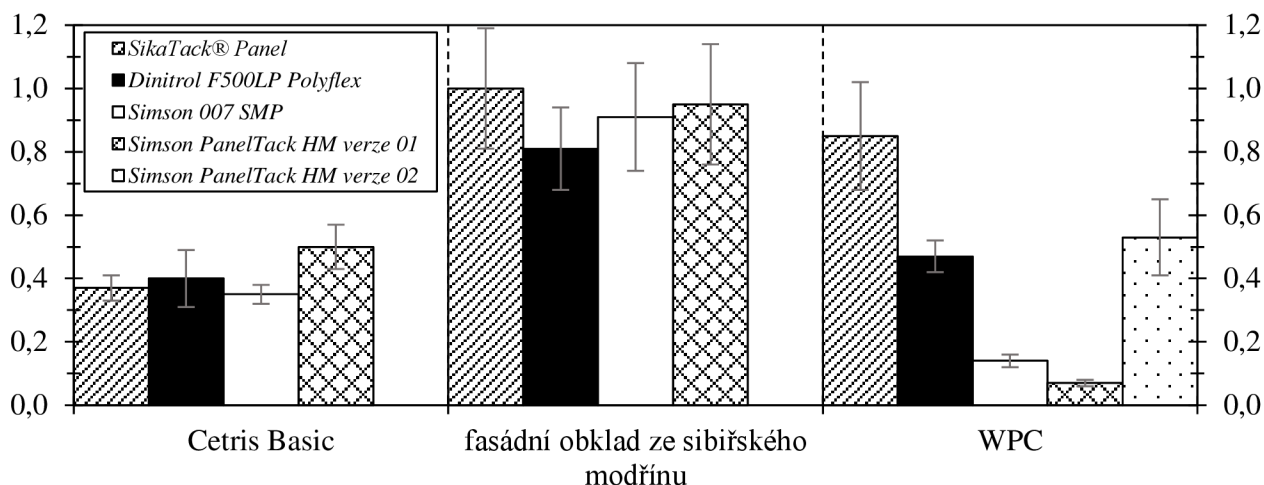
velikosti fasádního obkladu, jež je výstupem etapy II., je podstatnější hodnota smykové pevnosti spoje při tahovém namáhání.

U všech zkoušených kombinací, vyjma sestav se systémem Dinitrol, jsem zaznamenala obdobné pevnosti při porušení, viz výstupy grafického porovnání napětí na smykové ploše na obrázku č. 6. Bez ohledu na typ obkladu, výsledky systémů Sika a Simson HM jsou srovnatelné, naopak v případě systému Dinitrol jsem monitorovala výrazné odchylky v kombinaci s dřevěným a dřevoplastovým obkladem. Výsledky také potvrdily, že systém Simson 007 je pravděpodobně nejméně vhodným lepidlem pro zvolené typy obkladových materiálů. S dřevoplastem je zcela nekompatibilní. Domnívám se, že tento závěr do jisté míry vyvrátil předpoklad, že univerzální lepidlo může být použito pro lepení jakýchkoli druhů materiálů.



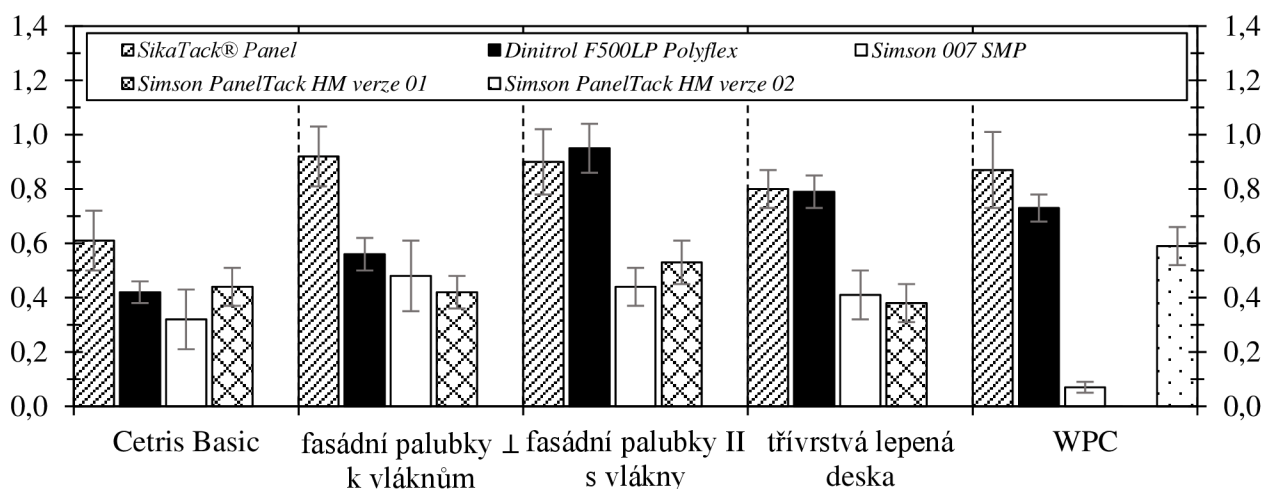
Obrázek č. 6 – Porovnání průměrného napětí lepených sestav na smykové ploše v N/mm^2 a převažujících způsobů porušení (AF – adhezní porušení; CF – kohezní porušení; FTF – vytržení obkladu a SF – porušení substrátu)

Dalším parametrem, na jehož základě jsem posuzovala adhezní vlastnosti vybraných materiálů je poměrné prodloužení spoje. Výsledné poměrné prodloužení lepicích systémů v kombinaci s fasádním obkladem ze sibiřského modřínu i dřevoplastu bylo ovlivněno způsobem porušení zkušebních vzorků. V případě dřevěného obkladu často docházelo k poruše podkonstrukce, ovšem u každého zkušebního vzorku konstrukce odolávala tlakům po jinou dobu, tudíž i prodloužení spoje byla značně rozdílná. I v případě dřevoplastového obkladu je z hodnot uvedených na obrázku č. 7 patrné, že špatné adhezní vlastnosti WPC měly podstatný vliv na délku prodloužení a na rozptyl výsledků měření posunu, viz např. směrodatná odchylka systému Sika a Simson HM.



Obrázek č. 7 – Porovnání průměrného prodloužení lepených sestav při tahovém namáhání v mm

Poměrné prodloužení a tažnost jednotlivých zkušebních vzorků jsem stanovila i pro zkušební vzorky pro stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Z grafického porovnání na obrázku č. 8 je zřejmé, že v průměru největšího prodloužení bylo dosaženo opět v kombinaci se systémem Sika. Směrodatné odchylky ovšem ukazují vysoký rozptyl hodnot jednotlivých měření. Naopak se systémem Dinitrol jsem většinou zaznamenala menší prodloužení, ale naměřené hodnoty jsou konzistentnější.



Obrázek č. 8 – Porovnání průměrného prodloužení lepených sestav ve smyku při tahovém namáhání v mm

Naměřená data z obou zkušebních metod zcela potvrdila hypotézu, že základním předpokladem vhodného lepicího systému fasádních obkladů je tažnost lepidla. Tato skutečnost je patrná především z výsledků naměřených v kombinaci se systémem Sika. U materiálů s vyšší pevností, zde dřevěný a dřevoplastový obklad, by mohl být vhodným systémem spíše Dinitrol, ovšem jeho vysoká tuhost v některých zkoušených případech zapříčinila předčasné porušení vzorku, což by u reálného fasádního systému mohlo mít fatální následky.

5.2. ETAPA II. - Stanovení optimální velikosti fasádního obkladu pomocí numerického modelu metodou MKP

Cílem druhé etapy této práce bylo stanovení optimální velikosti fasádního obkladu. Při návrhu geometrie obkladu je důležité zvážit všechna zatížení, která by na něj mohla v průběhu životnosti působit. Z hodnot stanovených pro jednotlivé kombinace materiálů vyplývá, že nejvýznamnější vliv na optimální velikost obkladu má tuhost podpory, tzn. zde lepeného spoje. Jelikož jsem u všech vybraných materiálů naměřila poměrně velkou teplotní i vlhkostní roztažnost, je nezbytné, aby lepený spoj byl poddajný a dokázal se bez vzniku většího vnitřního napětí těmto rozměrovým změnám přizpůsobit. Vhodným příkladem je montážní systém Sika. Ve všech zkoušených kombinacích jsem monitorovala konzistentní výsledky. Na rozdíl od ostatních systémů i při malém zatížení dokázalo lepidlo svým protažením částečně přenést napětí ve spoji. U jiných systémů jsem povětšinou zaznamenala předčasné porušení spoje. Není tedy překvapením, že maximální možné velikosti obkladů jsem ve všech zkoušených variantách doporučila se systémem Sika, viz tabulka č. 3.

Tabulka č. 3 – Návrh optimální velikosti fasádního obkladu

| Fasádní obklad/ Lepicí systém Rozměr | SikaTack® Panel | | Dinitrol F500LP Polyflex | | Simson 007 SMP | | Simson PanelTack HM | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------------------|-------|----------------|-------|------------------------|---------------------|
| | L ²⁰ | B ²¹ | L | B | L | B | L | B |
| Cetris Basic | 1 850 | 990 | 1 300 | 990 | 850 | 490 | 990 | 990 |
| Třívrstvá lepená deska | 2 150 | 990 | 2 000 | 990 | 800 | 490 | 850 | 490 |
| Fasádní palubky | 138 | 4 990 | 138 | 4 990 | 138 | 4 990 | 138 | 4 990 |
| WPC | 139 | 1 990 | 139 | 1 990 | x | x | 139 | 1 990 ²² |

Mnohdy jsou navržené rozměry diametrálně odlišné od ostatních zkoušených variant. U systémů Simson jsem velikost obkladu zmenšila až o 50 %. Značným překvapením jsou právě negativní výsledky systému Simson HM. Ačkoliv se jedná o systém určený přímo pro lepení dřevěných obkladů a obkladů na bázi dřeva, výstupy provedených měření jsou nepřesvědčivé. Všeobecně lze konstatovat, že vybraná lepidla na bázi MS polymerů jsou v porovnání s lepidly polyuretanovými méně tvárná a tužší. Tato vlastnost je dle mého názoru ve většině případů příčinou předčasného porušení spoje.

²⁰ Výška fasádního obkladu v mm.

²¹ Šířka fasádního obkladu v mm.

²² Jedná se o rozměry obkladu po provedení povrchové úpravy lepené plochy.

5.3. ETAPA III. – Stanovení odolnosti lepených fasádních segmentů metodou plošného zatěžování

Zkušební metoda plošného zatěžování, již je věnována třetí etapa, je de facto dalším ověřením odolnosti spoje proti tahovému namáhání. Její nesporná výhoda spočívá ve zkoušení uceleného fasádního segmentu v reálném měřítku. Zatímco prostřednictvím laboratorních měření jsem mohla posoudit vliv adhezních vlastností vybraných materiálů na pevnost spoje, prostřednictvím této metody jsem mohla mimo jiné zjistit, co je nejslabším článkem celého fasádního systému.

U všech zkoušených segmentů se jednalo o mechanický spoj mezi prvkem nosné podkonstrukce a nosníkem Doka. U segmentů s dřevěným obkladem jsem ověřila, že vyšší pevnosti spoje je možné dosáhnout navýšením počtu kotevních prvků. Avšak i v tomto případě došlo k porušení v místě mechanického kotvení, nikoliv k porušení lepeného spoje. Pro všechny zkoušené kombinace jsem na základě výstupů etapy I. a etapy II. predikovala úroveň zatížení a velikost protažení lepeného spoje. Předpokládané protažení jsem zaznamenala pouze v kombinaci se systémem Simson 007, viz tabulka č. 4.

Hodnoty naměřené u segmentu s obkladem Cetrus jsou však velice podobné, jak je také patrné z porovnání na obrázku č. 9. Porovnání výstupů segmentů s a bez montážní pásky ukazuje, že páska může mít vliv na pevnost spoje. Jsem toho názoru, že při ověřování pevnosti a kompatibility materiálů fasádního systému, například metodou plošného zatěžování, je vhodné pásku nepoužívat.

Hodnoty maximálního zatížení při porušení a průhybů zaznamenané u obou zkušebních segmentů s fasádními palubkami, viz tabulka č. 5 a porovnání na obrázku č. 10, jsou srovnatelné. Domnívám se, že v tomto případě zvolené množství mechanických kotevních prvků představovalo ekvivalent množství naneseného lepidla. Při použití polovičního množství vrutů, což je u tohoto typu fasádního obkladu častější řešení, by dle mého názoru bylo možné očekávat porušení na úrovni zatížení cca 1 200 kg/m².

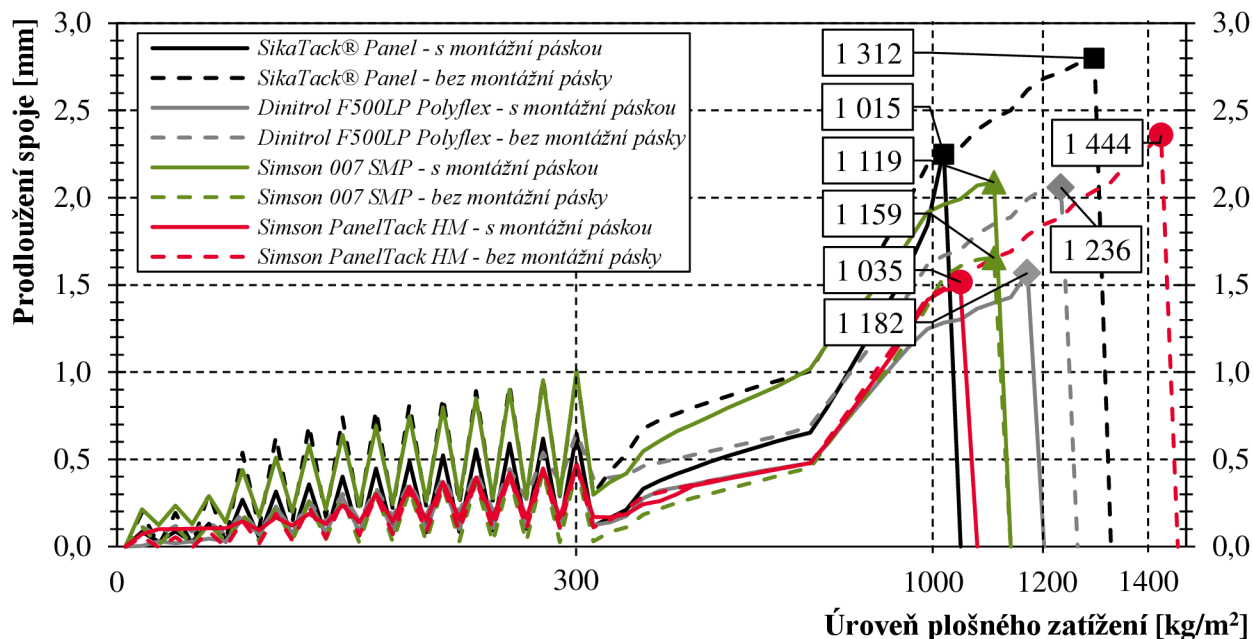
U zkušebních segmentů s mechanickým kotvením jsem ve všech zkoušených případech zaznamenala několikanásobně větší prodloužení spoje, které u velkoformátových obkladů vedlo i k porušení celého segmentu. U vzorků s lepeným spojem bylo porušení obkladu vždy zapříčiněno destrukcí nosné podkonstrukce. Nejednalo se tedy o primární typ poruchy. Lze předpokládat, že zatímco u mechanického spoje by fasádní obklad v reálné situaci celý z fasády odpadl, u lepeného spoje by jednotlivé menší fragmenty stále zůstaly přilepené k nosné podkonstrukci, dokud by nebylo přistoupeno k jejich manuálnímu odstranění.

Tabulka č. 4 – Úroveň zatížení a prodloužení spoje při porušení segmentů s obkladem Cetris Basic

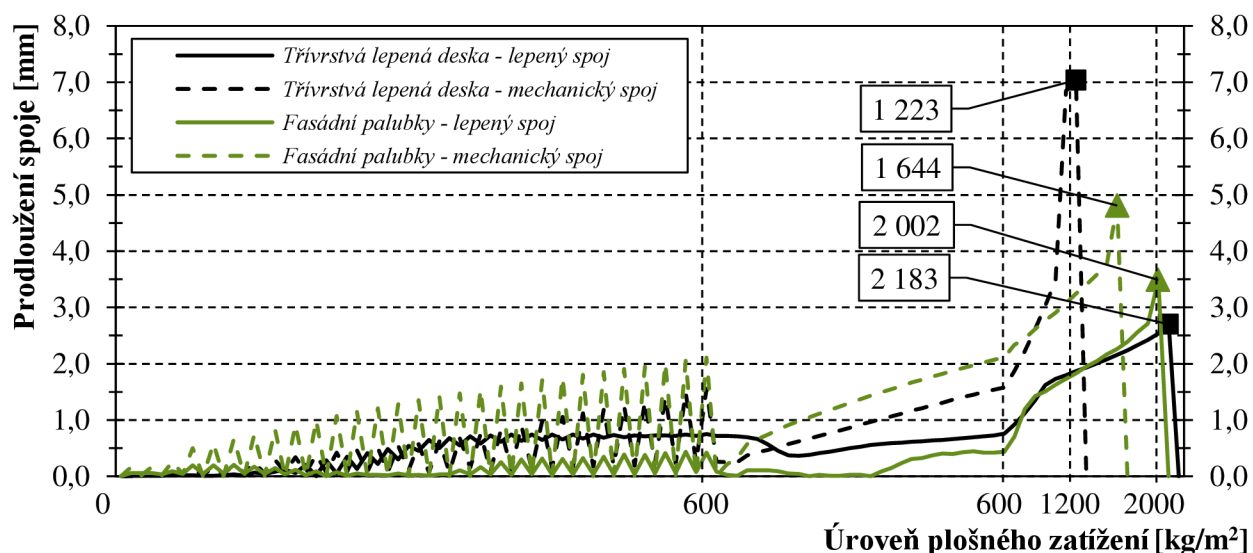
| Lepicí systém | Úroveň zatížení [kg/m ²] | Prodloužení lepeného spoje [mm] |
|--|---|------------------------------------|
| SikaTack® Panel | | |
| – předpokládané prodloužení | 927 | 3,28 |
| – s montážní páskou | 1 015 | 2,28 |
| – bez montážní pásky | 1 312 | 2,80 |
| Dinitrol F500LP Polyflex | | |
| – předpokládané prodloužení | 893 | 2,56 |
| – s montážní páskou | 1 182 | 1,57 |
| – bez montážní pásky | 1 236 | 2,03 |
| Simson 007 SMP | | |
| – předpokládané prodloužení | 846 | 2,02 |
| – s montážní páskou | 1 119 | 2,09 |
| – bez montážní pásky | 1 159 | 1,66 |
| Simson PanelTack HM | | |
| – předpokládané prodloužení | 846 | 2,83 |
| – s montážní páskou | 1 035 | 1,48 |
| – bez montážní pásky | 1 444 | 2,36 |
| Mechanický spoj – fasádní spojovací prvek | | |
| – mechanický spoj | 1 012 | 9,80 |

Tabulka č. 5 – Úroveň zatížení a prodloužení spoje při porušení segmentů s dřevěným obkladem

| Fasádní obklad | Úroveň zatížení [kg/m ²] | Prodloužení lepeného spoje [mm] |
|--|---|------------------------------------|
| Třívrstvá lepená deska | | |
| – předpokládané prodloužení lepeného spoje | 1 630 | 5,31 |
| – lepený spoj | 2 183 | 2,70 |
| – mechanický spoj | 1 223 | 7,04 |
| Fasádní palubky ze sibiřského modřínu | | |
| – předpokládané prodloužení lepeného spoje | x | 5,75 |
| – lepený spoj | 2 002 | 3,49 |
| – mechanický spoj | 1 644 | 4,81 |



Obrázek č. 9 – Porovnání průběhu plošného zatěžování fasádních segmentů s obkladem Cetris Basic



Obrázek č. 10 – Porovnání průběhu plošného zatěžování fasádních segmentů s dřevěným obkladem

5.4. Stanovení vlivu nestandardních zkušebních postupů

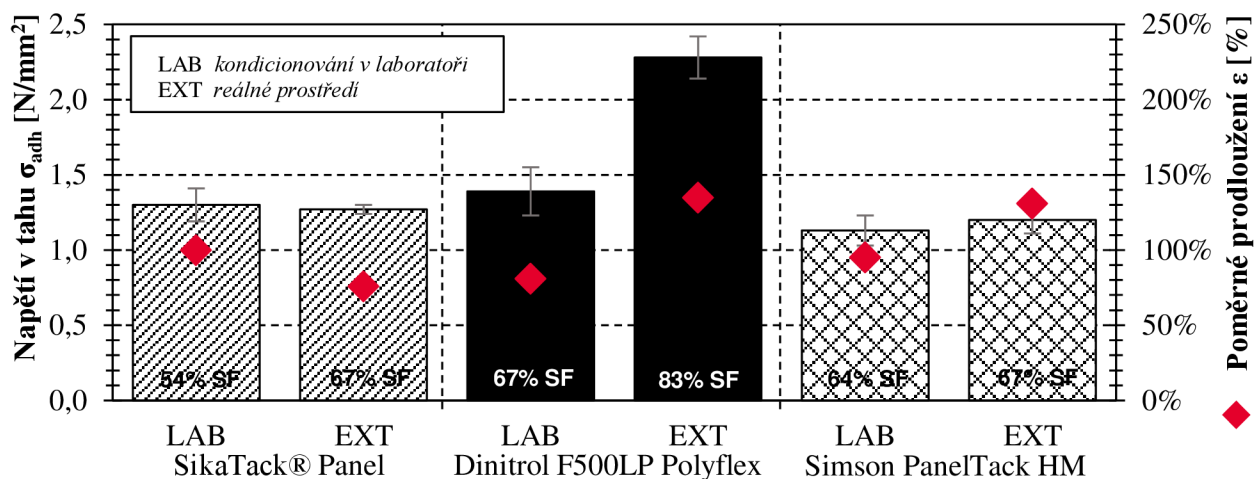
Závěrem práce se věnuji dvěma nestandardním metodám ověření adhezních vlastností.

5.4.1. Stanovení vlivu reálného prostředí

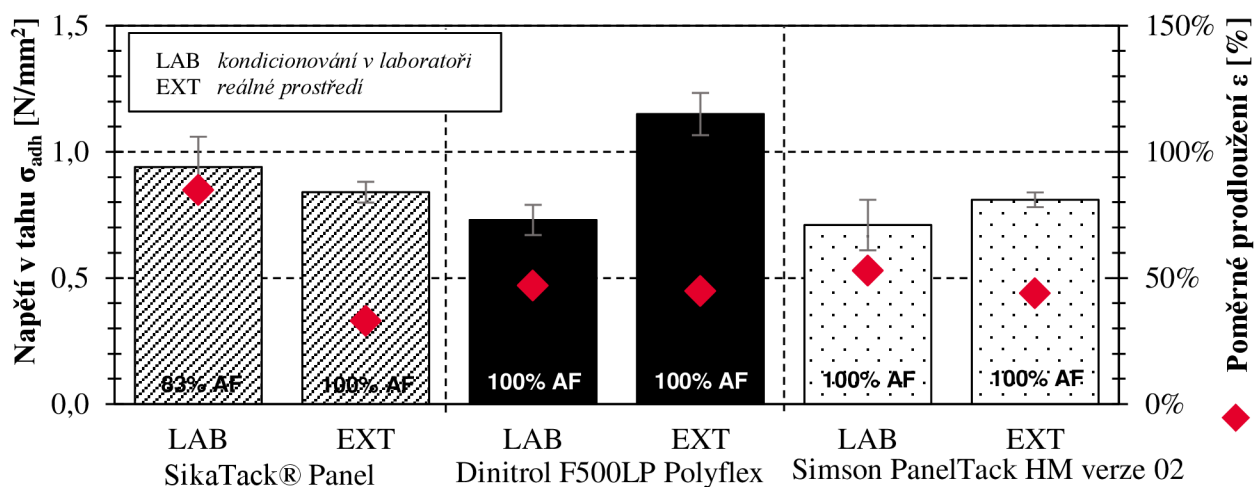
První metoda ověřuje vliv reálného prostředí na pevnost lepeného spoje. Komparace výsledků této metody a metod umělého stárnutí ukázala, že zvolené metody kondicionování vhodně simulují působení povětrnostních vlivů. Jak je patrné z výsledků prezentovaných

na obrázku č. 11 a na obrázku č. 12, naměřené hodnoty jsou velice podobné. Pouze v kombinaci se systémem Dinitrol jsem zaznamenala větší napětí u vzorků vystavených působení reálného prostředí.

Výsledky sledované v kombinaci s WPC obkladem opět potvrdily nutnost provedení úpravy lepené plochy. I v této kombinaci jsem naměřila podobné hodnoty jako v případě laboratorních zkoušek. Domnívám se, že u této kombinace je možné sledovat mírný vliv prostředí na maximální protažení lepeného spoje při porušení. Především v kombinaci se systémem Sika, kdy u obou obkladů došlo ke snížení protažení až o cca 61 %. K ověření této hypotézy by bylo nutné zkoušet sadu více vzorků. Z výsledků je možné pozorovat, že vliv reálného prostředí na systém Dinitrol není tak značný, jako vliv vybraných metod kondicionování. U obou zkoušených obkladů jsem naměřila o cca 60 % vyšší napětí na lepené ploše.



Obrázek č. 11 – Porovnání způsobu porušení, napětí na lepené ploše a poměrného prodloužení vzorků kondicionovaných v laboratoři a v reálném prostředí – fasádní palubky ze sibiřského modřínu

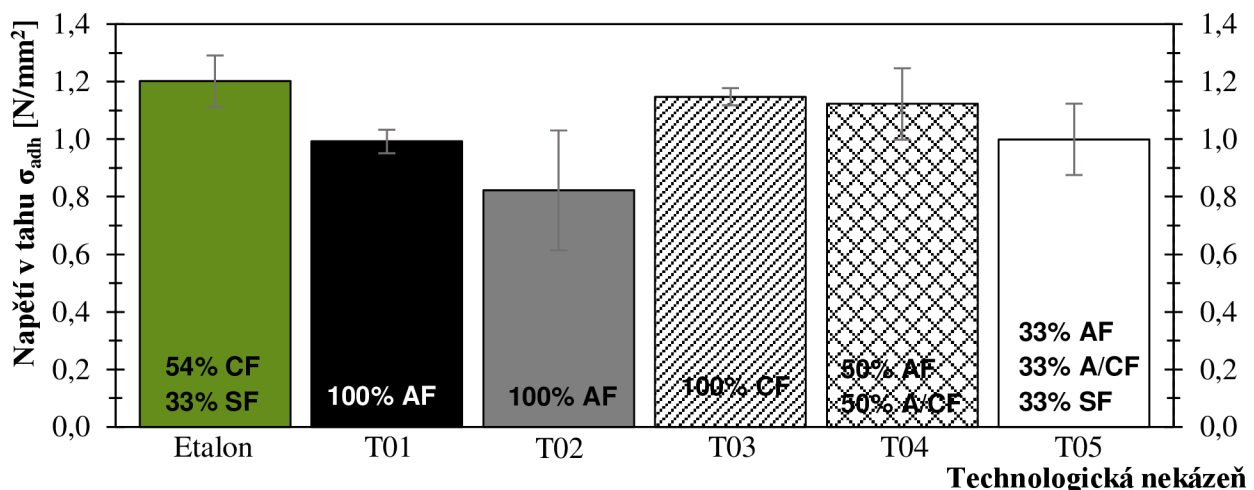


Obrázek č. 12 – Porovnání způsobu porušení, napětí na lepené ploše a poměrného prodloužení vzorků kondicionovaných v laboratoři a v reálném prostředí – dřevoplastový obklad

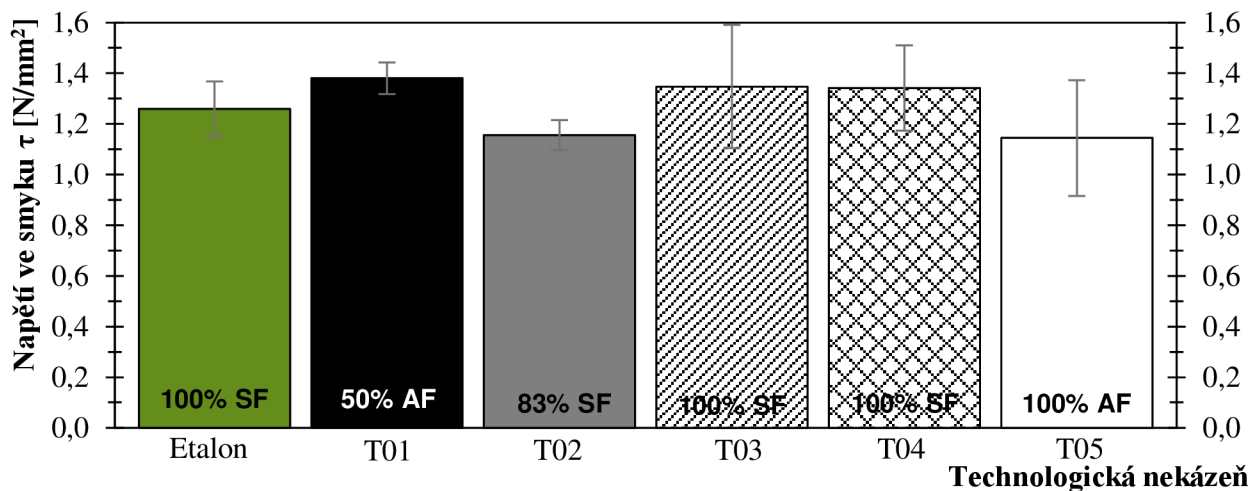
5.4.2. Posouzení vlivu technologické nekázně

Druhý nestandardní přístup k posouzení adhezních vlastností lepených sestav byl zaměřen na vliv technologické nekázně. Ačkoliv se jedná pouze o případovou studii, její výsledky ukazují, že ne vždy nedodržení doporučeného technologického postupu musí nutně vést k předčasnému porušení spoje či ke snížení adhezních vlastností. Jak je patrné z grafického porovnání na obrázku č. 13 a obrázku č. 14, hodnoty naměřené u obou zkušebních metod, tj. přídržnost a pevnost ve smyku, jsou velice podobné. Především u vzorků etalonu, a to včetně přesnosti měření vyjádřeného směrodatnou odchylkou. Dále je zřejmé, že nejvíce negativní vliv na mechanické vlastnosti lepené sestavy má nekázeň T02, tj. aplikace zlepšovacího nátěru na vlhký substrát.

Jak je patrné z porovnání výstupů zkoušky pevnosti ve smyku na obrázku č. 4, zde jsem zaznamenala negativní vliv nekázně T05, tj. aplikace lepidla na substrát bez zlepšovacího nátěru, na způsob porušení lepených sestav.



Obrázek č. 13 – Porovnání způsobu porušení a průměrných přídržností sestav při tahovém namáhání v N/mm²



Obrázek č. 14 – Porovnání způsobu porušení a průměrného napětí na smykové ploše v N/mm²

6. ZÁVĚRY A PŘÍNOS PRÁCE

Hlavním cílem předložené disertační práce bylo zkoumání adheze a adhezních vlastností lepených povrchů fasádních obkladů z materiálů na bázi dřeva. V úvodu práce se zabývám charakterizací adheze a adhezních vlastností lepených povrchů, jež jsou i dnes považovány za komplikovaný fenomén založený na hledání mezioborových souvislostí, a to především z oblasti chemie, fyziky a mechaniky. Tyto vzájemné vztahy v práci zkoumám prostřednictvím rozsáhlého výzkumu z oblasti lepených spojů, který jsem rozdělila do tří etap na sebe navzájem navazujících.

Hlavní přínos předložené práce spatřuji v prokazatelném potvrzení hypotézy, že montážní systémy jsou vhodnou náhradou tradičních metod spojování, což jsem prokázala především prostřednictvím využití metody plošného zatěžování, kdy nejslabším článkem celého fasádního systému byl spoj mechanický nikoliv lepený. Možnosti využití metody plošného zatěžování za účelem ověření spolupůsobení jednotlivých komponent fasádního systému jsem ověřila v etapě III. Zvolená metoda poskytuje komplexní informace o chování fasádního segmentu při působení tahového namáhání s možností využití cyklického zatěžování zkušební vzorku, kromě výše uvedeného umožňuje sledování vlivu tlaku na únavovou pevnost spoje apod.

Dále jsem ověřila, že bez rozdílu druhu materiálu studium adheze a adhezních vlastností lepených povrchů vyžaduje nejenom makroskopický, ale i mikroskopický přístup se zaměřením na zkoumání fyzikálně - chemických vlastností. Mimo to prezentované výstupy ukazují, že ne všechny materiály jsou vhodné k lepení v *syrovém* stavu, přestože výrobce montážního systému uvádí opačnou informaci. Výstupy etapy I. ovšem ukazují, že zlepšení adhezních vlastností je možné dosáhnout vhodnou úpravou lepených ploch. Konkrétně volba povrchové úpravy vyžaduje mikroskopickou studii lepených povrchů. Domnívám se, že se jedná o jednu z vhodných oblastí budoucího výzkumu. Ideálním příkladem je dřevoplastový obklad, kde by měl být posouzen vliv plastové složky na adhezní vlastnosti, či vliv poměru plastové a dřevěné složky materiálu.

V etapě I. jsem také potvrdila, že vybrané tahové zkoušky jsou příhodné pro stanovení adhezních vlastností lepených sestav, avšak není vhodné zkoušet minimální doporučený počet zkušebních vzorků. Tento přístup je zcela nevhodný. Výstupy tahových zkoušek prokázaly, že pevnost a poměrné prodloužení lepených sestav jsou diametrálně odlišné u různých druhů materiálů a v porovnání s hodnotami deklarovanými výrobcem montážních systémů. Tato skutečnost pouze potvrzuje hypotézu, že je vhodné zkoušet vybranou kombinaci materiálů, nikoliv vycházet pouze z informací uvedených v technických listech.

Analýza výsledku etapy II. jasně demonstruje, že mechanická odolnost fasádního systému může být ovlivněna tuhostí vybraného montážního systému. Příliš tuhé lepidlo může být příčinou výskytu předčasných poruch. Tuhost lepeného spoje má také značný vliv na maximální možný rozměr fasádního obkladu. Pro materiály křehké, zde zastoupeno obkladem Cetris Basic, jsou vhodná lepidla k jejichž plastické deformaci dochází při nižším zatížení. Naopak obklady houževnaté, zde např. dřevoplast, mohou být spojovány i lepidly méně tvárnými. Dále bylo potvrzeno, že pro některé materiály fasádních obkladů, například Cetris Basic nebo masivní dřevěnou lepenou desku, je lepený spoj vhodnějším způsobem uchycení, a to z důvodu velké teplotní a vlhkostní roztažnosti. Výstupy zkoušek také ukazují, že tento způsob kotvení je velmi vhodný pro velkoformátové obklady. Rozměr obkladu ovšem není limitující, jak ukázaly kladné výsledky v kombinaci s fasádními palubkami.

Značný přínos práce dále spatřuji v sestavení zkušební metodiky a detailním popisu základních kroků za účelem ověření adhezních vlastností různých materiálů, nejen zde představených. Postup je použitelný pro účely zkoušení nejenom fasádních lepených spojů. Popsaná metodika je aplikovatelná i na montážní lepidla, jimž doposud byla věnována malá pozornost. Vliv teploty, vlhkosti či technologické nekázně v souvislosti s těmito lepidly doposud nebyl dostatečně vyzkoumán a popsán. Domnívám se, že metodiku zkoušení adhezních vlastností materiálů, kroky zkušebních postupů a metodiku analýzy výstupů je možné použít i v oblasti pedagogické. Jedná se o prostředek umožňující: představení problematiky lepených spojů a lepení samotného, charakteristiku kladů a záporů lepených spojů (nejenom fasádních), či představení kroků metody plošného zatěžování. Vybrané kapitoly této práce mohou sloužit jako příklad vlivu působení teploty a vlhkosti na stavební materiály aj.

Posledním nepochybným přínosem této práce je dle mého názoru řada odborných článků, jež vedly k rozšíření řešené problematiky do širšího povědomí odborné veřejnosti. Publikované výsledky a informace mohou podpořit častější použití montážních systémů v kombinaci s obklady ze dřeva a na bázi dřeva.

Výsledky a analýza výstupů experimentálního výzkumu prezentovaného v předložené disertační práci také nabízí hned několik oblastí potenciálního rozvoje budoucího výzkumu. Některé možnosti jsem již nastínila, dále se jedná například o následující oblasti:

- Studium vlivu teploty na vlastnosti fasádního spoje, např. pevnost a životnost.
- Studium vlivu rozdílné tloušťky vrstvy lepidla na pevnost lepeného fasádního spoje.
- Studium vlivu technologické nekázně na adhezní vlastnosti a na soudržnost lepeného spoje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PUŠKÁR A. a kol. *Obvodové pláště budov – Fasády*. 1. vyd. Bratislava: Nakladatelství Jaga group, v.o.s., 2002. 311 s. ISBN 80-88905-72-9.
- [2] GABRIEL I. *Dřevěné fasády – materiály, návrhy, realizace*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2011. 136 s. ISBN 978-80-247-3819-2.
- [3] KOLB J. *Dřevostavby – Systém nosných konstrukcí, obvodové pláště*. 3. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2011. ISBN 978-80-247-4071-3.
- [4] KNAACK U. a kol. *Façades – Principles of Construction*. 2. vyd. Basilej: Birkhäuser Verlag GmbH, 2014. ISBN 978-3-03821-044-3.
- [5] BLAHA V. Kolik dřevostaveb se staví v České republice a kolik stojí?. *Dřevostavitel*, 2016. [online] URL: <<https://www.drevostavitel.cz/clanek/kolik-drevostaveb-se-stavi-v-ceske-republice>> [cit. 2018-04-12].
- [6] MRÁZKOVÁ Z. Fasády a zateplení – při rekonstrukci domu jedna z nejdůležitějších částí. *Stavebnictví3000.cz*, 2014. URL: <<http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/fasady-a-zatepleni-pri-rekonstrukci-domu-jedna-z-nejdulezitejsich-casti/>> [cit. 2018-04-12].
- [7] *Český internet s.r.o.* [online]. POJAR P. (Česká republika) [cit. 2017-09-17]. URL: <<https://www.ceskestavby.cz/jak-se-stavi-dum/fasada-omitky-5656.html#odstavec12>>.
- [8] *Fasáda*. [online] URL: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/Fasáda>> [cit. 2018-05-31].
- [9] *Facade*. [online] URL: <<http://www.dictionary.com/browse/facade>> [cit. 2017-09-17].
- [10] BIRKELAND Ø. *Curtain Walls*. Norwegian Building Research Institute, 1962. 72 s.
- [11] *EzineArticles.com* [online]. ROBINSON D.A. (Velká Británie) [cit. 2018-05-06]. URL: <<http://ezinearticles.com/?A-Potted-History-of-Rainscreen-Cladding&id=2090843>>.
- [12] *EQUITONE – Planning and Application Guide*. Burton upon Trent: MarleyEternit, 2014. 176 s. [online]. URL: <<http://marleyeternit.co.uk>>. [cit. 2018-05-06].
- [13] *European History of Rain Screen, Climate Shield Systems*. [online]. URL: <<http://www.climate-shield.com/european-climate-shield-history>> [cit. 2018-05-07].
- [14] BIKAS D. a kol. Ventilated Facades: Requirements and Specifications Across Europe. *Procedia Environmental Sciences*. 2017, roč. 38, s. 148-154. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.096.
- [15] ŠAGÁT E. *Větrání obvodových plášťů budov*. Bmo, 2016. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Bmě. Fakulta stavební. Vedoucí práce Libor Matějka.
- [16] LIŠKA P. *Revitalizace vybraných lehkých obvodových plášťů budov, realizovaných u nás do roku 1990*. Bmo, 2016. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Bmě. Fakulta stavební. Vedoucí práce Barbora Kovářová.
- [17] IBAÑEZ-PUY M. et al. Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review. *Renew. Sustain. Energy. Rev.* 2017, roč. 79, s. 180–191. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.059.
- [18] DE GRACIA A. et al. Numerical modelling of ventilated facades: a review. *Renew. Sustain. Energy. Rev.* 2013, roč. 22, s.539–549. DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.029.
- [19] FUČILA J. & SZOMOLÁNYIOVÁ K. *Montované prvky: vonkajšie a vnútorné montované obklady, podhlady, podlahy a priečky*. Nakladatelství Jaga group, v.o.s., 2005. 247 s. ISBN 80-80760-15-2.
- [20] ČERMÁK S. *Návrh fasádního obkladu ze dřeva a z materiálů na jeho bázi*. Bmo, 2013/20146. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Bmě. Lesnická a dřevařská fakulta. Vedoucí práce Helena Křenková.
- [21] KUKLÍK P. a kol. *Dřevěné konstrukce*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2005. 188 s. ISBN 80-01-03310-4.
-

-
- [22] KRÁL P. & HRÁZSKÝ J. Dřevěné fasády. In *Vše o dřevě v interiéru a exteriéru* (ed. VODIČKOVÁ E.). Bratislava: Jaga group, 2008. s. 47-50. ISSN 1335-9177.
- [23] HRAPKOVÁ L., RYCHTÁŘ J. & VESELÝ V. Fasádní obklady dřevěné a z materiálů na bázi dřeva. *Stavební partner*. 2012, roč. 1, č. 1, 13 s.
- [24] ČSN EN 13119. *Lehké obvodové pláště - Terminologie*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018. 24 s. Třídící znak 74 7200.
- [25] ČSN 74 7251. *Skládané pláště, obklady a pláště z panelů – Požadavky na přesnost osazení, kvalitu a vzhled*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018. 24 s. Třídící znak 50 4195.
- [26] PETRIE E.M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2. vyd. New York, NY: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2007. 765 s. ISBN 978-0-071-47916-5.
- [27] DA SILVA L.F.M., ÖCHSNER A. & ADAMS R.D. *Handbook of Adhesion Technology*. 1. vyd. Berlín: Springer-Verlag, 2011. 1568 s. ISBN 978-3-642-01168-9.
- [28] EBNEAJAD S. *Adhesives Technology Handbook*. 2. vyd. New York: William Andrew, 2008. 387 s. ISBN 978-0-8155-1533-3.
- [29] EBNEAJAD S. *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*. 2. vyd. Londýn, UK: William Andrew, Elsevier, 2014. 341 s. ISBN 978-0-323-26435-8.
- [30] KUCZMASZEWSKI, J. *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*. Lublin: Lublin University of Technology. Polish Academy of Sciences, Lublin Branch, 2006. 199 s. Vedoucí dizertační práce prof. dr hab. inž. Robert Sikora.
- [31] MITTAL K.L. & PIZZIA A. *Handbook of Adhesive Technology: Revised and Expanded*. 2. vyd. New York, NY: CRC Press, 2003.
- [32] MITTAL K.L. *Progress in Adhesion and Adhesives*. 2. vyd. New Jersey: Wiley, 2017. 437 s. ISBN 978-1-119-40638-9.
- [33] LEE L.H. *Fundamentals of adhesion*. New York, NY: Plenum Press, 1991.
- [34] LACOMBE R. *Adhesion Measurement Methods*. 1. vyd. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. 439 s. ISBN 0-8247-5361-5.
- [35] *Adhesion*. [online] URL: <<http://www.dictionary.com/browse/adhesion>> [cit. 2017-07-22].
- [36] ČSN EN 923. *Lepidla - Termíny a definice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. 64 s. Třídící znak 66 8501.
- [37] BURCHARDT B. R. & MERZ P. W. Elastic Bonding and Sealing in Industry. In *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2. vyd. Elsevier Science Ltd, 2006. 487 s. ISBN 978-0-08-044708-7. Kapitola 6, s. 355-xlii.
- [38] *Základy teorie lepení*. Poradenské centrum společnosti LEAR, a.s. URL: <<http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni.html>> [cit. 2017-05-12].
- [39] KRÜGER G. & SCHNEIDER R. An Elastic Adhesion System for Structural Bonding of Facade Panels. *Otto – Graf – Journal*. 1999, roč. 10, s. 87-98.
- [40] ČSN 73 2577. *Zkouška přidrženosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí k podkladu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, 1981. 4 s. Třídící znak 32691
- [41] ČSN EN 1465. *Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 12 s. Třídící znak 66 8510.
- [42] ČSN 73 2579. *Zkouška mrazuvzdornosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, 1981. 4 s. Třídící znak 32733.
- [43] ČSN 73 2581. *Zkouška odolnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí proti náhlým teplotním změnám*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a měření, 1983. 8 s. Třídící znak 31163.
-

- [44] *Bezpečnostní list – Plotové wpc prkno NEXTWOOD*. Brno: DG Tip, spol. s r.o., 2013. 2 s.
- [45] *Podklady pro projektování*. Hranice: CIDEM Hranice, a.s. – divize Cetris, 2011. 220 s.
- [46] *Technický list – SIBIŘSKÝ MODŘÍN*. Praha: m.t.a. spol. s r.o., 2018. 1 s.
- [47] *Agrop SWP Vícevrstvá masivní deska – Technická dokumentace*. Ptení: AGROP NOVA a.s., 2016. 64 s.
- [48] *SikaTack® Panel System - Montážní systém pro provětrávané fasádní panely*. Brno: Sika CZ, s.r.o., 2016. 6 s.
- [49] *Dinitrol F500LP Polyflex: Technický list*. Liberec: AUTO-COLOR spol. s r.o., 2013. 5 s.
- [50] *Wall cladding panel engineering: Professional adhesive systems for exterior wall cladding panels*. Hertogenbosch, NL: Bostik B.V., 2017. 8 s.
- [51] *Simson 007: Technický list*. Hertogenbosch, NL: Bostik B.V., 2016. 2 s.
- [52] *Vylučování extrémních hodnot souboru*. [online]
URL: <<https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn2/extremy.htm>> [cit. 2017-08-25].
- [53] ČSN 64 0528. *Plasty. Stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993. 4 s. Třídící znak 32668.
- [54] ČSN ISO 10365. *Lepidla – Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Praha: Český normalizační institut, 1995. 5 s. Třídící znak 66 8509.
- [55] ASTM D 5573. *Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2005. 3 s.
- [56] JIRÁSEK M., ŠMILAUER V. & ZEMAN J. *Pružnost, pevnost, plasticita*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mechaniky. 2016, 29 s.
- [57] ETAG 034. *Kits for External Wall Claddings – Part I: Ventilated Cladding Kits Comprising Cladding Components and Associated Fixings*. Brusel: European Organisation for Technical Approvals, 2012. 98 s. [online] URL: <<http://www.eota.org>>.
- [58] ETAG 034. *Kits for External Wall Claddings – Part II: Cladding Kits Comprising Cladding Components, Associated Fixings, Subframe and Possible Insulation Layer*. Brusel: European Organisation for Technical Approvals, 2012. 29 s. [online] URL: <<http://www.eota.org>>.
- [59] ČSN EN 12179. *Lehké obvodové pláště – Odolnost proti zatížení větrem – Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 8 s. Třídící znak 74 7202.
- [60] *Determination of the Resistance to Wind Loads of Partially Bonded Roof Waterproofing Membranes*. Brusel: European Organisation for Technical Approvals, 2003. 4 s. [online] URL: <http://www.sgpstandard.cz/editor/files/stav_vyr/dok_es/eta/tr/005.pdf> [cit. 2017-05-19].
- [61] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 129 s. Třídící znak 73 0035.

OSOBNÍ ÚDAJE

Jméno a příjmení: **Ing. et Ing. Barbora Nečasová**
 Research ID: D-9771-2018
 ORCID ID: 0000-0001-9926-9437
 Státní příslušnost: Česká republika
 email: necasova.b@fce.vutbr.cz

Vzdělání

2005 - současnost Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
 2012 - současnost Doktorský studijní program – Stavební inženýrství, obor Pozemní stavby
 2009 - 2012 Navazující magisterský studijní program – Stavební inženýrství, obor Realizace staveb
 2005 - 2009 Bakalářský studijní program – Stavební inženýrství, obor Pozemní stavby
 2012 - 2014 Ústav soudního inženýrství, obor Soudní znalectví - Realitní inženýrství
 1997 - 2005 Cyrilometodějská střední pedagogická škola a Gymnázium

Studijní pobyty

09/2017 Luleå University of Technology, Division of Industrialized and sustainable construction, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Švédsko
 06/2017 European Federation of Green Roofs and Living Wall Associations (NPO), Rakousko
 09/2015 Linnaeus University, Department of Building Technology, Švédsko
 06/2015 Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), Department of Mechanical Engineering (DEMec), Portugalsko
 08/2013 – 12/2013 Edinburgh Napier University, Centre for Timber Engineering (CTE) - Forest Products Research Institute, Velká Británie

Projekty

2017 - současnost MPO TRIO FV20606 - Technologie lepení velkoformátových obkladových prvků
 2017 FAST - S - 17 - 4255 - Experimentální ověření vlivu technologické nekázně na mechanickou odolnost lepených fasád
 2017 FAST - S - 17 - 4329 - Úprava povrchu obkladu z dřevoplastu (WPC) pro zlepšení jeho adhezních vlastností
 2016 - současnost MPO FV10075 - Nová technologie vícepodlažních energeticky úsporných budov z lepených sendvičových panelů s možností zakládání na zemních vrstech s využitím technologie prefabrikovaných bytových jader
 2016 FAST - S - 16 - 3434 - Experimentální ověření technologického řešení konstrukce trvale udržitelné mobilní stavby s důrazem na její stavebně - fyzikální chování
 2015 FAST - J - 15 - 2728 - Analýza odolnosti dřevěné provětrávané fasády s lepenými spoji proti zatížení větrem
 2013 - 2014 MPO FR - TI4/332 - Nové technologie lepených obvodových pláštíků budov s kotvicími prvky se zvýšenou odolností vůči korozi

VYBRANÁ PUBLIKAČNÍ ČINNOST

1. NEČASOVÁ B. a kol. Test of adhesion and cohesion of silicone sealants on facade cladding materials within extreme weather conditions. *Advanced Materials Research*. 2014, roč. 1041, s. 23-26. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.23.
2. LIŠKA P., ŠLANHOF J. & NEČASOVÁ B. Revitalization of facade cladding with the use of bonded joints. *Advanced Materials Research*. 2014, roč. 1041, s. 191-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.191.
3. LIŠKA P. a kol. Determination of tensile properties of selected building sealants in combination with high-pressure compact laminate (HPL). *Procedia Engineering*. 2015, roč. 108, s. 199-205. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.137.
4. NEČASOVÁ B. a kol. Determination of adhesion of silyl modified polymer adhesives to wooden façade cladding - Case study. *Procedia Engineering*. 2015, roč. 108, s. 410-418. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.165.
5. NEČASOVÁ B., LIŠKA P. & ŠLANHOF, J. Adhesion and Cohesion Testing of Joint Sealants after Artificial Weathering - New Test Method. *Procedia Engineering*. 2017, roč. 190, s. 140-147. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.319.
6. LIŠKA P., NEČASOVÁ B. & ŠLANHOF J. Evaluating adhesion of weatherproofing sealant joints: Price Vs. Quality. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II - Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT 2016*. 2017, s. 525-530.
7. NEČASOVÁ B., LIŠKA P. & ŠLANHOF J. Research summary: Analysis of selected adhesive systems intended for facade Bonding. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II - Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT 2016*. 2017, s. 573-578.
8. ŠLANHOF J., NEČASOVÁ B. & LIŠKA P. Evaluation of test methods for testing of sealants. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II - Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT 2016*. 2017, s. 643-648.
9. LIŠKA P. a kol. Revitalization of Lightweight Cladding of Buildings and Its Impact on Environment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, roč. 95 (4), DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042008.
10. NEČASOVÁ B., LIŠKA P. & NOVOTNÝ, M. Impact of thermal and moisture expansion on design of wooden façade elements for retrofitting of buildings. *Key Engineering Materials*. 2018, roč. 776, s. 15-22. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.776.15.
11. NEČASOVÁ B., LIŠKA P. & ŠLANHOF J. Performance of selected polyurethane joint sealants in concrete structures. In *MATEC Web of Conferences*. 2018, roč. 146. DOI: 10.1051/mateconf/201814602015.
12. NOVOTNÝ M. & NEČASOVÁ, B. Facade renovation-replacement and restoration of the panels in a monument protected object. In *MATEC Web of Conferences*. 2018, roč. 146. DOI: 10.1051/mateconf/201814603013.
13. LIŠKA P., NEČASOVÁ B. & ŠLANHOF J. Influence of Load-bearing Structure on Size of Bonded Facade Cladding. In *MATEC Web of Conferences*. 2018, roč. 163. DOI: 10.1051/mateconf/201816308003.
14. NEČASOVÁ B., LIŠKA P. & KELAR J. Study on Surface Treatments of Modified Wood Plastic Composite (WPC) to Improve Adhesion. In Buildings and Environment - Energy Performance, In *Smart Materials and Buildings. Applied Mechanics and Materials*. 2016, roč. 861, s. 96-103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.861.96.