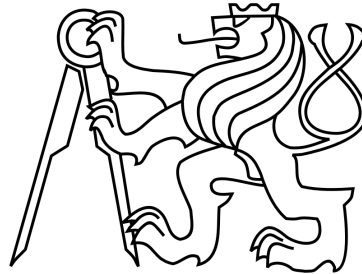


FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Uhlíková vlákna ve stavebnictví

Zobanov Vladislav

2018

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.



Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Veškeré použité podklady, ze kterých jsem čerpal informace, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a citovány v textu podle normy ČSN ISO 690.

V Praze, dne

Zobanov Vladislav



Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D. za čas a odborné konzultace při tvorbě této bakalářské práce.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Zobanov Jméno: Vladislav Osobní číslo: 438498
Zadávací katedra: Katedra technologie staveb: K122
Studijní program: (B3651) Stavební inženýrství
Studijní obor: (3607R045) Příprava, realizace a provoz staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Uhlíková vlákna ve stavebnictví
Název bakalářské práce anglicky: Carbon fibers in building industry

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše k využití uhlíkových vláken a uhlíkových kompozitů ve stavebnictví - historie materiálu, druhy materiálu a způsoby jeho výroby a vlastnosti.(+)
- 2) Porovnání výhod a nevýhod technologie vyztužování na bázi uhlíkových vláken s klasickou ocelovou nebo jinou nekovovou výztuží.(практицка)
- 3) Požadavky na provádění (přípravenost pracoviště a vnější faktory) při použití uhlíkových vláken.
- 4) Technologie provádění vyztužování konstrukcí uhlíkovými vlákny (primárně i dodatečně).
- 5) Příklady použití výztuže z uhlíkových vláken - popis realizace, technologické a časové náročnosti.
- 6) Alternativní návrh vyztužení na uvedených příkladech.
- 7) Porovnání technologické, časové a finanční náročnosti uvedených příkladů.

Seznam doporučené literatury:

- 1) ČSN 73 0038, Navrhování a posuzování stavebních konstrukcí při přestavbách, 1986.
- 2) ČSN 73 1201-86 Navrhování železobetonových konstrukcí, 1986.
- 3) Časopis stavebnictví/Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží
- 4) L.C. Hollaway and J.G. Teng "Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FPR) composites.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 14.02.2018 Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Abstrakt

Cílem dané práce je výzkum oblasti použití kompozitů na základě uhlíkového vlákna ve stavebnictví. Teoretická část je věnována historickému rozvoji daného materiálu, jeho typům a vlastnostem. Dále se zkoumá jeho použití ve stavebnictví. Praktická část práce obsahuje obhlížení technologií zesílení pomocí UV a následuje porovnání s tradičními postupy. Porovnání probíhá z hlediska technologické, finanční a časové náročnosti.

Klíčová slova

Uhlíkové vlákno, kompozitní materiál, zesilování konstrukcí, uhlíkovými vlákny tvrzené plasty



Abstract

The objective of this bachelor's thesis is to analyze an application area of the carbon fiber-based composite materials in the construction industry.

Theoretical part will focus on the material's history, taking into account its classification, performance indicator, and evolution. Furthermore, examples of carbon fiber-based materials usage in civil and structural engineering are submitted. The second part, the practical one, will review strengthening technologies using carbon fiber, including a confrontation with the classical technology. At the end of the work, the technologies are assessed according to economic, temporal and technological criteria.

Key words

Carbon fiber, composite material, strengthening of structures, carbon-fiber-reinforced plastic



ÚVOD	9
1. Kompozity	10
1.1 Synergický efekt	10
1.2 Uhlíkové kompozity	11
1.3 Uhlíkové vlákno	11
1.3.1 Historie	11
1.3.2 Výroba	12
1.3.3 Dodatečné zpracování UV	14
1.4 Matrice	15
1.4.1 Vlastnosti matrice	15
1.4.2 Matrice v kompozitu	15
1.5 Vlastností vláken a kompozitů	15
2. Uhlík ve stavebnictví	18
2.1 Zesílení konstrukce	19
2.1.1 Typy CFRP materiálu pro zesilování	19
2.1.2 Princip zesílení konstrukce	21
2.2 Použití uhlíkových vláken v mostních konstrukcích	27
2.2.1 Zesílení mostní konstrukce	27
2.2.2 Počáteční výztuž mostních konstrukcí s materiály na bázi uhlíkových vláken	29
2.3 Beton vyztužený uhlíkovými vlákny	31
2.3.1 Výstavba nových budov	32
2.3.2 Rekonstrukce	34
2.4 Konstrukční prvek	35
2.4.1 Podlahový systém CFRP	35
2.4.2 CFRG	37
2.5 Další využití uhlíkových vláken ve stavebnictví	39
2.5.1 Výztužná síť	39
2.5.2 Ochrana proti zemětřesení	40
3. Rekonstrukce Nemocnice Hořovice	41
3.1 Vymezení problému a cíl práce	41
3.2 Technologický předpis	42
3.2.2 Vymezení předmětu řešení	43
3.2.3 Vstupní materiály a výrobky	43
3.2.4 Zásady manipulace, dopravy a skladování materiálu	44
3.2.5 Metody kontroly kvality materiálu	45
3.2.6 Připravenost pracoviště	45
3.2.7 Struktura pracovní čety	46
3.2.8 Bezprostřední podmínky pro práci	46
3.2.9 Stroje a přístroje, pracovní pomůcky	46
3.2.10 Technologický postup doplněný postupovým diagramem	47
3.2.11 Jakost provedení	51
3.2.12 BOZ a PO	52
3.2.13 Vliv na životní prostředí	54
3.3 Porovnání	56
3.3.1 Navrh alternativních technologií zesílení	56
3.3.2 Ekonomické porovnání	57



3.3.3 Porovnání časové náročnosti.....	59
3.3.4 Rizika spojená s technologiemi.....	61
3.3.5 Stručný přehled kritérií a variant.....	62
3.3.6 Vyhodnocení.....	63
ZÁVĚR	68
SEZNÁM POUŽITÝCH ZDROJŮ	70



ÚVOD

Soudobé stavebnictví se aktivně rozvíjí. Zavedení nových stavebních materiálů a soudobých stavebních praktik hodně napomáhá zvýšení kvality a zrychlení stavebního procesu. Během druhé stavební revoluce otevřela výroba oceli a její využití ve stavebnictví nové horizonty v konstrukčních řešeních budov a různých objektů. Díky pevnostním vlastnostem dovolilo použití ocele stavět vyšší budovy, větší prostory a lehké objekty (stadiony, mosty atd.), které jsou zároveň značných rozměrů. Ocel nahradila železo, které kdysi nahradilo bronz, a bronz ve své době nahradil měď. V této souvislosti vystává otázka, co nahradí ocel? Jeden z takových materiálů, který má veškeré šance v budoucnu nahradit ocel a již ji částečně nahrazuje, je polymerní kompozitní materiál na základě uhlíku. V následující práci budou zvýrazněné výhody a nevýhody těchto materiálů, v jakých případech se vyplatí použití kompozitů a v jakých jsou vhodné tradiční materiály. Základem této bakalářské práce bude výzkum oblasti použití kompozitních polymerů na bázi uhlíku ve stavebnictví a mým cílem je zjistit, zda bude tento materiál vhodnou náhradou tradičních stavebních technologií.



1. Kompozity

Kompozitní materiál je typ materiálu, ve kterém jsou specifickým způsobem kombinovány dvě nebo více komponent, u nichž se výrazně liší mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Výsledné vlastnosti kompozitu jsou dány kombinací vlastností všech obsažených složek a jejich objemových podílů [1].

Kompozitní materiály nejsou ve stavebnictví žádná novinka. Za první použití kompozitního materiálu můžeme počítat směs hlíny a slámy, ze které se stavělo ještě před rokem 800 před naším letopočtem [2]. Dalším významným kompozitním materiálem je beton (směs cementu a kameniva či šterku). Kompozitní materiály se skládají nejméně ze dvou komponent, z nichž jedna nese funkci pojiva (matrice) a druhá je výztuž [1].

1.1 Synergický efekt

Spojení různorodých látek vede k vzniku nové látky či materiálu, jehož vlastnosti se od každé ze základních látek kvantitativně a jakostně liší. Jinými slovy, když celek je větší než suma základních látek, dochází k synergickému efektu [3].

Nejjednodušší popis tohoto efektu uvádí Ing. Alena Vimrová, Ph.D: *„V případě, že do obchodu s porcelánem zavřete na noc kočku, ráno přijdete a najdete několik málo rozbitých váz, které kočka shodila při procházce po regálu, ale jinak žádné velké škody. V případě že do téhož obchodu zavřete psa, ten se ani po regálu procházet nebude, a škody budou ještě nižší. Představte si, když ale do téhož obchodu zavřete na noc kočku se psem...“* [5].

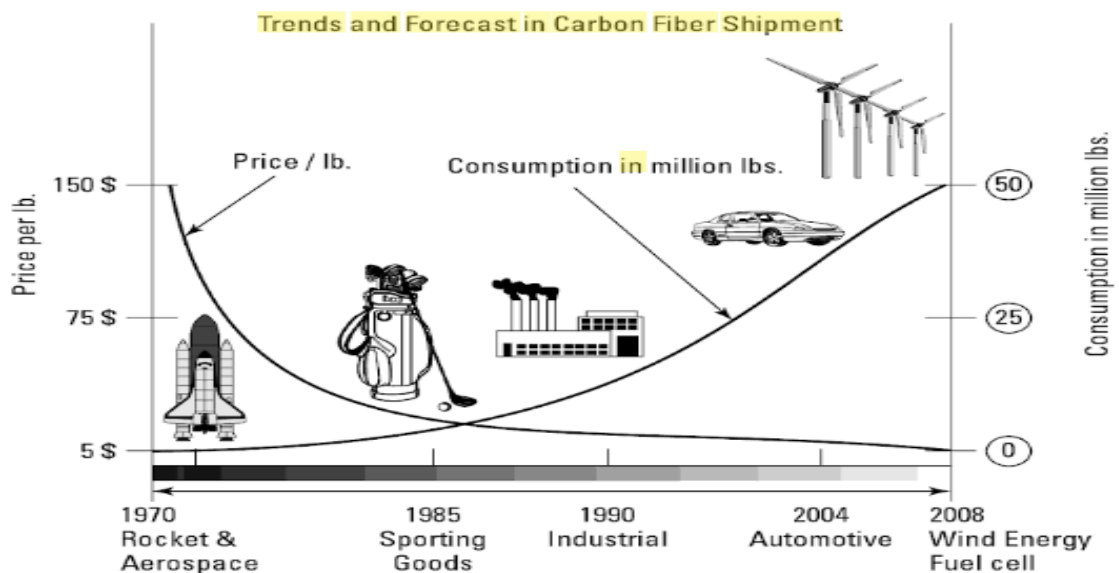
Nicméně to, že spojíme dva různé komponenty, ještě neznamená, že dosáhneme nutného výsledku. K dosažení takového, jaký potřebujeme, je nezbytně nutné brát v úvahu některé vlastnosti. Je to například zátěž a směr, v jakém budou na daný kompozit působit síly. Na základě toho budou látky v kompozitu použity a umístěny různě tak, aby bylo dosaženo maximálního prospěchu z výhod každého komponentu a zároveň maximálního snížení slabých stránek výsledného kompozitu, které byly dány vlastnostmi základních komponentů [3].



1.2 Uhlíkové kompozity

Jedním z příkladů polymerního kompozitu je kompozit na bázi uhlíkového vlákna. Tento kompozit má sestavnou strukturu složenou z uhlíkových vláken (výztuž) a matrice. Mechanické vlastnosti tohoto kompozitu se determinují vysokou pevností uhlíkového vlákna, tuhostí matrice a silou spoje mezi matricí a uhlíkovým vláknem [4]. Kompozitní materiály na bázi uhlíkového vlákna mají vysoké ukazatele pevnosti a tuhosti a zároveň mají nízkou váhu (viz. tabulka č. 2). Uhlíkové vlákno předčí ostatní vláknová plniva v pevnosti a modulu pružnosti (viz. tabulka č. 1).

Díky svým parametrům se kompozity na bázi uhlíkového vlákna skvěle hodí pro použití ve stavebním průmyslu. Největším problémem daného materiálu, je jeho poměrně vysoká cena ve srovnání s tradičními materiály, jako je například ocel. Přesto se s vývojem technologií a poptávkou po vysoce pevných a lehkých materiálech cena kompozitů na bázi uhlíku postupně snižuje (obr.č 1). Níže bude podrobně probrána struktura daného materiálu.



Obr.1 - Trendy a prognózy přepravy uhlíkových vláken, zdroj:[6].

1.3 Uhlíkové vlákno

1.3.1 Historie

Informace o prvním použití uhlíkového vlákna se vztahují ke známému americkému vynálezci Thomasi Edisonovi. V roce 1880 použil Edison uhlíková



vlákna záření v prvních žárovkách. Tato vlákna se od dnešních uhlíkových vláken poněkud lišila. Tehdy použil Edison materiály na bázi celulózy, jako jsou bavlna a bambus, které mají stejné pozitivní vlastnosti jako moderní materiály, a to například odolnost vůči vysokým teplotám [4].

Trvalo sedmdesát let, než se zájem o uhlíková vlákna znovu objevil. Důvodem bylo hledání materiálů vhodných pro výrobu raketových motorů. Díky svým vlastnostem jsou uhlíková vlákna nejvhodnější pro použití v roli výztužných materiálů, jelikož jsou známa vysokou tepelnou odolností, dobrými tepelně izolačními vlastnostmi, korozní odolností vůči plyným a kapalným látkám, vysokou specifickou pevností a tuhostí [4].

V roce 1958 byly v USA získány UV na bázi viskózních vláken, které umožnily dosáhnout hodnoty limitu pevnosti v $330 - 1030$ MPa a modulu pružnosti 40 GPa [4].

V roce 1961 byla v Japonsku získána uhlíková vlákna na bázi polyakrylonitrilních (PAN) vláken. Vlastnosti prvních uhlíkových vláken na bázi PAN byly nízké, ale postupně se technologie zlepšila a za deset let (do roku 1970) byla získána uhlíková vlákna na bázi PAN-vláken s pevností v 2070 MPa a modulu pružnosti 480 GPa. Tehdy se ukázala možnost získání uhlíkových vláken za použití této technologie s ještě vyššími mechanickými vlastnostmi: modulem pružnosti do 800 GPa a pevností větší než 3 Gpa. Uhlíková vlákna na bázi ropných smol byla získána v Japonsku v roce 1970 [4].

V současné době je již známo takové množství různých složek, vlastností a technologií, nebo typů používaných uhlíkových vláken a jejich rozsah velmi rychle roste. V praxi se používají různé možnosti klasifikace UV. Výrobci, podniky nebo firmy, jim nejčastěji dávají značky, které zpravidla zcela neodrážejí složení nebo vlastnosti výrobků. Někdy se podobné vlastnosti a podobné složení materiálů objeví pod různými názvy.

1.3.2 Výroba

Jedním z hlavních rysů rozdílu ve vlastnostech uhlíkových vláken je materiál, ze kterého byla vlákna získána. V dnešní době je pro strojírenství



zajímavé UV na bázi PAN a na bázi smoly. Zbytek prekurzorů má buď nevhodné vlastnosti pro použití ve stavebnictví, nebo příliš vysokou cenu.

1.3.2.1 Vlákna na bázi PAN

Vyrábějí se se širokou škálou vlastností a tvoří nejvýznamnější část produkce uhlíkových vláken.

Proces výroby se skládá z čtyři kroků:

- Stabilizace - slouží k převedení prekurzoru na vlákno s termálně stabilní strukturou (je netavitelné), které lze karbonizovat s dostatečným výnosem uhlíku a bez poničení vlákna. Probíhá na vzduchu při teplotách 200 – 300 °C. [4].

- Karbonizace - stabilizovaná vlákna jsou dále pyrolyzována v inertní atmosféře, zajištěné cirkulací dusíku. Během pyrolýzy dochází ke kondenzaci a cyklizaci. Karbonizace bude probíhat do teplot 1 100 – 1 400 °C. V některých případech bývá teplota ještě vyšší. Pro získání vláken s vysokou odolností, však většinou teplota karbonizace nepřesahuje zmíněných 1 400 °C. [4].

- Grafitace - jde o fázi, ve které se zvyšuje koncentrace uhlíku ve vlákně až nad 99 %. Grafitizace se provádí v dusíkové nebo argonové atmosféře v indukčně vyhřívaných pecích při teplotách od 2400 až po 3000 °C. Vzniká tak uspořádaná vrstvená struktura [4].

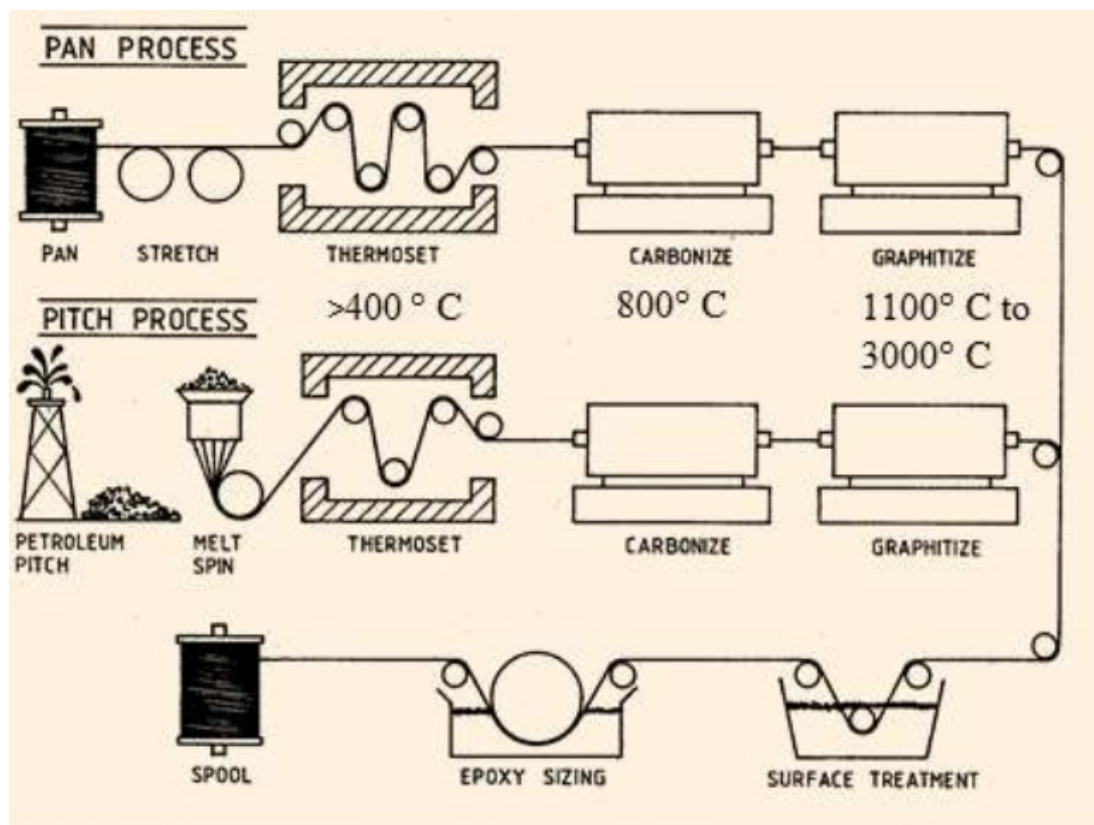
- Povrchová úprava - cílem povrchové úpravy je zvýšit možnost adheze vláken k různým matricím (pryskyřice, sklo, keramika, uhlík), které jsou u kompozitu použity. Proces povrchové úpravy nejčastěji spočívá v opatrné a kontrolované oxidaci vlákna v plynném, nebo kapalném prostředí. V plynné fázi bývá nejčastěji používán kyslíkem obohacený vzduch nebo oxid uhličitý. [4].

1.3.2.2 Vlákna na bázi smol

Jako prekurzor jsou tu použity ropné smoly, ale i pyrolytické smoly vyrobené termickým rozkladem aromatických sloučenin, jako je např. naftalen,



nebo PVC. Výroba je v podstatě stejná jako u PAN, rozdíl je jenom v přípravě prekurzoru. Smola musí být zbavena všech nečistot a minerálních příměsí, přičemž se udržuje pracovní teplota 300 až 450 °C. Poté se může provádět zvláknování a ostatní fáze přípravy jako u PAN [7].



Obr.2 - Výroba vláken, zdroj:[8].

1.3.3 Dodatečné zpracování UV

Je třeba si uvědomit, že ve většině případů jsou uhlíková vlákna materiálem, ale málokdy konečným produktem. Z uhlíkových vláken jsou vytvořeny různé produkty, z nichž některé se používají ve stavebnictví.

Uhlíkové vlákno je nejvíce používané k vyztužení kompozitních materiálů. Rozložení vláken v matrici má významný vliv na vlastnosti kompozitů. Můžeme rozlišit dvě metody ukládání uhlíkových vláken: vlákna mohou být volně rozptýlena v matrici nebo distribuována v určitém směru. Metoda řízeného uspořádání nabízí velkou výhodu v mechanických vlastnostech. Takže můžeme uhlíkové vlákno rozmístit jak v jednom směru, tak i v několika směrech. Jednosměrné polohování poskytuje požadované vlastnosti ve směru vláken. Avšak v kolmém směru bude zatížení nést jenom



matice. Pro řešení tohoto problému jsou uhlíková vlákna propojena, což zaručí schopnost přenášet napětí v mnoha směrech [4,9].

1.4 Matrice

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, který tvoří základní stavební prvek výsledného kompozitu. V případě kompozitních materiálů se uhlíková vlákna kombinují s pryskyřicovou, kovovou a s uhlíkovou matricí [1]. Pro stavební účely je nejvhodnější matrice pryskyřicová, je to také nejpopulárnější kompozitní matrice. Dále bude v práci slovem „matrice“ míněna pryskyřicová matrice, protože v současné době jsou ostatní typy pro stavebnictví nevhodné.

1.4.1 Vlastnosti matrice

V normálním stavu (není-li součástí kompozitu) nelze pryskyřici v konstrukci použít jako výztužný prvek. I přes svou dobrou chemickou odolnost a snadnou manipulaci (zpracovatelnost) má nízkou hustotu, její mechanické parametry jsou dostatečně malé. Její modul pružnosti je 6 Gpa, pevnost 100 MPa. Dále je pryskyřice křehká a má malou creepovou odolnost [10].

1.4.2 Matrice v kompozitu

Bez ohledu na své nízké mechanické parametry je matrice jednou z nejdůležitějších částí kompozitu, protože zajišťuje:

- přenos namáhání na vlákna,
- poskytuje napětí od vlákna k vláknu,
- udržuje geometrickou polohu vláken a tvar výrobku,
- chrání vlákno před vlivy okolního prostředí [1].

1.5 Vlastností vláken a kompozitů

Jak už bylo zmíněno výše, účelem kompozitu je nejen vytvořit nebo posílit parametr, ale i zmenšit jeho nevýhody. Díky vzájemnému působení uhlíkových vláken a pryskyřicové matrice se tvoří zcela nový materiál, jehož parametry by nikdy nebyly těmito komponenty dosaženy samostatně. Níže budou základní vlastnosti, které autor považuje za důležité pro použití ve stavebnictví.

Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken.



Uhlíkové vlákno má vysokou pevnost v tahu, modul pružnosti a kromě toho nízkou hustotu. V tabulce jsou uvedeny parametry vláken pro srovnání.

Tab.1. Srovnávací charakteristiky kompozitních vláken. Zdroj: [20].

Vlákno	Pevnost v tahu [Mpa]	Modul pružnosti[Gpa]	Délková roztažnost [%]	Hustota [t/m ³]
Uhlík vysokopevnostní ¹	4300–4900	230–240	1,9–2,1	1,8
Uhlík vysokomodulový ¹	2740–5500	290–330	0,7–1,9	1,78–1,81
Uhlík vysokomodulový ²	2600–4020	540–640	0,4–0,8	1,91–2,12
Aramid	3200–3600	124–130	2,4	1,44
Sklo	2400–3500	70–85	3,5–4,7	2,6

1-PAN 2-SMOLA

Typické základní mechanické vlastnosti CFRP a jejich srovnání s běžnou betonářskou ocelí a FRP materiály.

Tab.2 - Srovnávací charakteristiky FRP a ocelí. Zdroj: [19].

Vlastnost	Materiál			
	Ocel	GFRP	CFRP	AFRP
Modul v podélném směru [GPa]	200	35 až 60	100 až 580	40 až 125
Modul v příčném směru [GPa]	200	cca 8 až 9	cca 10 až 12	cca 5 až 6
Tahová pevnost ve směru vláken [MPa]	300 až 600	450 až 1600	600 až 3500	1000 až 2500
Tlaková pevnost ve směru vláken [MPa]	300 až 600	cca 1/2 z tahové pevnosti	cca 1/2 z tahové pevnosti	cca 1/4 z tahové pevnosti
Příčná tahová pevnost [MPa]	300 až 600	30 až 40	30 až 40	30 až 40
Objemová hmotnost [kg/m ³]	7850	cca 2100	cca 1600	cca 1400



CFRP materiály jsou velmi tuhé. Jde o fyzikální veličinu, charakteristickou pro každé pružné těleso, udávající míru změny jeho délky vzhledem k velikosti působící vnější síly. Plast vyztužený uhlíkovými vlákny má téměř dvakrát menší pevnost než samotné uhlíkové vlákno, přesto má dvakrát větší pevnost než běžná ocel a výrazně vyšší než většina materiálů.

Odolnost proti korozi a chemická stabilita.

Přestože samotné uhlíkové vlákno nezhoršuje, je epoxid citlivý na sluneční světlo a musí být chráněn [12].

Elektrická vodivost.

Tato funkce může být užitečná i obtěžující. Vodivost uhlíkových vláken může usnadnit galvanickou korozi v armaturách a naopak je vodivost vhodná při použití CFRP jako snímače v konstrukci [12].

Tepelná vodivost.

Tepelná vodivost je schopnost konstrukce vést teplo. Orientace vláken, konfigurace a objemová frakce jsou faktory, které mohou ovlivnit šíření tepla v kompozitních částech. Kromě toho mohou být různé typy speciálně navrženy pro vysokou nebo nízkou tepelnou vodivost [12].

Teplotní roztažnost.

Teplotní roztažnost je jev, při kterém se po dodání/odebrání tepla změní tělesu délkové rozměry (objem tělesa). Tato veličina je důležitá vlastnost pro mimořádné případy, neboť umožňuje udržet tvar a tuhost při vysokých teplotách. Uhlíkové vlákno může mít širokou škálu koeficientu teplotní roztažnosti, a to v závislosti na směru měření vazby tkaniny, prekurzorového materiálu, na bázi Pan (vysoká pevnost, vyšší CTE) nebo na bázi Smol (vysoký modul/tuhost, nižší CTE). Má hodnoty od $-1,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}^0$ do 0 [12].

Anizotropie.

Anizotropie je vlastnost, kterou se označuje závislost určité veličiny na volbě směru. Takové vlastnosti jsou v různých směrech různé. Při výběru výrobku z uhlíkových vláken je jedním z nejdůležitějších faktorů znalost toho, jaké síle může tento materiál odolat. Kompozity a zejména materiály na bázi



uhlíkových vláken jsou anizotropy. Na rozdíl od kovových materiálů, které jsou izotropní [12].

Ohnivzdornost.

Samotné uhlíkové vlákno není hořlavé, a to na rozdíl od epoxidové pryskyřice. Proto hovoříme o nedostatečné odolnosti proti ohni. Při 600 °C začíná měknout a jsou zapotřebí opatření pro jeho ochranu v případě požáru. Nicméně ve vakuu si uhlík udržuje své vlastnosti i při zahřátí nad 1700 °C [12].

2.Uhlík ve stavebnictví

Pokud jde o používání nových materiálů na bázi plastů ve stavebnictví, stojí za to si uvědomit následující skutečnosti. Stavebnictví je nejasný termín, který zahrnuje širokou škálu oblastí, od dokončovacích prací po „megastavby“. Uhlíkové vlákno díky svým jedinečným vlastnostem našlo uplatnění v mnoha stavebních oblastech. Když mluvíme o uhlíkových vláknech, máme na mysli všechny možné kombinace tohoto materiálu, ať už jsou to vlákna, nebo kompozitní materiály.

V současné době jsou za populární materiály považovány beton a ocel, které jsou charakterizovány nízkou cenou komponentů, ale vysokými náklady na zpracování a instalaci, navíc mají srovnatelně nízkou možnost zpracování. Výsledkem zavedení uhlíkových vláken může být následující:

- snížení konečných nákladů,
- zvýšená produktivita,
- redukce hmotnosti,
- vylepšení příležitostí při navrhování ve srovnání s tradičními materiály,
- odolnost proti korozi,
- snadné zpracování a instalace,
- snadná údržba.



Nicméně nesmíme zapomínat na nedostatky tohoto materiálu, takže ho nelze jen tak zavádět do všech oborů a doufat, že nahradí tradiční materiály. Navíc před použitím uhlíkových vláken ve stavebnictví existují překážky jako:

- slabé znalosti a málo zkušeností ve srovnání s tradičními materiály,
- obtížnost přenosu zkušeností získaných v jiných odvětvích,
- nízká kvalifikace stavitelů,
- cena.

V této kapitole autor zkoumá oblasti, ve kterých našla uhlíková vlákna svá uplatnění.

2.1 Zesílení konstrukce

Průmyslové a občanské stavby v provozu jsou vystaveny působení zatížení a agresivních vlivů na životní prostředí, tyto faktory mají negativní vliv na konstrukci. Aby mohly konstrukce plnit svou funkci a životy lidí nebyly ohroženy, je zapotřebí včasné obnovení a zesílení, které lze provádět tradičním a moderním způsobem. Každá z těchto metod má své vlastní klady a zápory. V této kapitole navrhuje autor zvážit, jaká jsou zesílení pomocí CFRP a jaké typy jsou používány.

2.1.1 Typy CFRP materiálu pro zesilování

Kompozitní materiály používané při opravách a vyztužení stavebních konstrukcí lze rozdělit do dvou skupin:

- vytvářené přímo při stavebním procesu na stavebním objektu (mokrý proces),
- tovární výroba (suchý proces) [13].

První skupina je založena na použití látek s uspořádáním vláken v jednom (jednosměrné) nebo v několika směrech. Tkaniny (obr.3) se dodávají v kotoučích a používají se v takzvané „mokrý“ metodě. Jsou lepeny na povrch vrstvy zpevněné konstrukce vrstvou po vrstvě pomocí speciálních



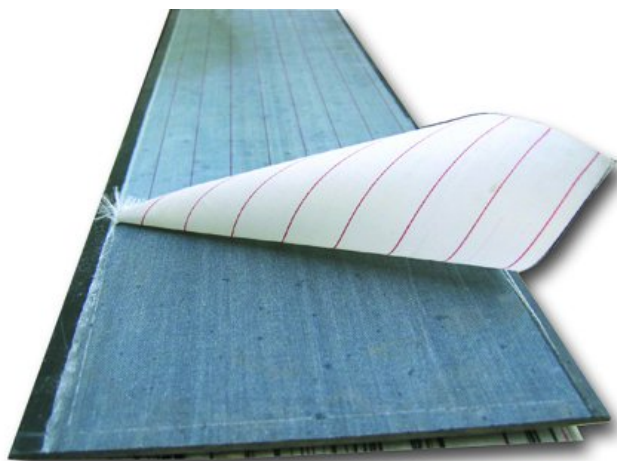
epoxidových pryskyřic s impregnací pryskyřic do každé vrstvy. Kompozit se vytváří, když je pryskyřice vytvrzena za přírodních podmínek [13].



Obr.3 – uhlíkový tkaninový materiál, zdroj:[14].

Kompozity druhé skupiny (obr.4,5) jsou tuhé. Vyrábějí se v továrně způsobem impregnování tkanin polymerem a následným vytvořením potřebného počtu vrstev tkáně. Výsledkem jsou tuhé kompozitní lamely a tyče.

Cena lamely a tyče je mnohem vyšší než cena tkaniny, ale namáhavost práce při jejich použití může být nižší než u „mokrě“ (vrstvené) metody zesílení [13].



Obr.4 – uhlíkovo-vláknité CFRP lamely, zdroj:[14].



Obr.5 – uhlíkovo-vláknité tyče, zdroj:[14].

Současně to vyžaduje velké náklady na práci a materiál, aby se před laminováním připravil povrch konstrukce (vyrovnání). Možnosti použití „mokré“ metody tvorby kompozitu jsou širší než při použití suché. Pomocí měkké tkáně lze snadno provádět i složité prostorové tvary [13].

2.1.2 Princip zesílení konstrukce

Princip vyztužení uhlíkovými vlákny lze nazvat vnějším zpevněním konstrukcí. Výztužný materiál je pokládán na vnějším povrchu konstrukce a upevněn speciálním montážním lepidlem na bázi epoxidové pryskyřice. Tento systém, stejně jako exoskelet, účinně reaguje na nárůst strukturálních deformací konstrukce. Použití uhlíkových vláken umožňuje uzavřít trhliny a jiné vady vzniklé na povrchu materiálu kvůli škodlivým vlivům prostředí a obnovit požadovanou konstrukční pevnost [15].

Rychlá a snadná instalace prvků vnější výztuže z uhlíkových vláken je hlavní výhodou netradiční metody. Navíc vnější výztuha nenarušuje estetický vzhled struktury a proces zesílení se stává mnohem jednodušší než tradiční technologie.

Stejně jako u jakékoli jiné zesilovací techniky je zvažována varianta, která má určité nevýhody. Za prvé je to vysoká cena za materiál. Kromě vysoké ceny je to potřeba dodatečné ochrany před požárem.

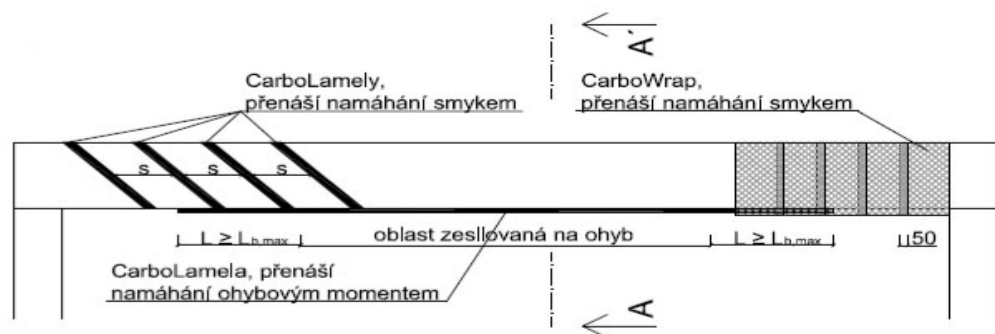
V závislosti na typu konstrukce je zesílení uhlíkovými vlákny rozděleno do 4 typů.



2.1.2.1 Zesílení železobetonových konstrukcí

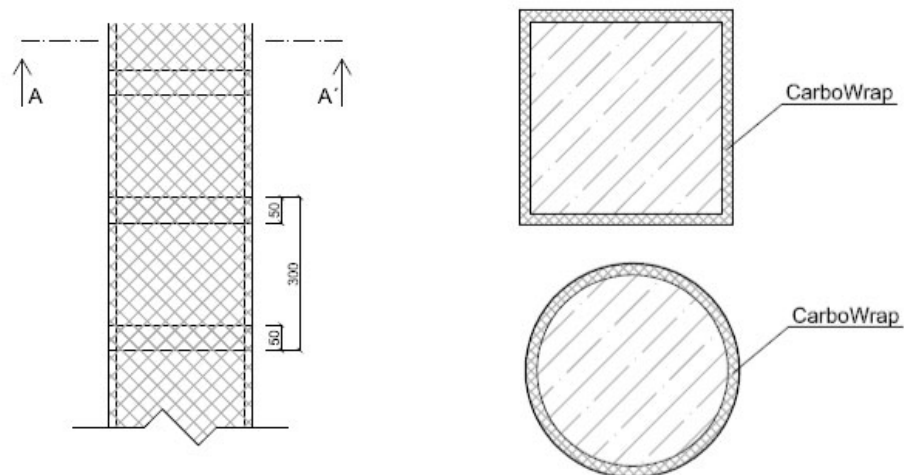
Zesilování železobetonových prvků může být zapotřebí v případě narušení strukturální integrity, zvýšení zatížení a také zvýšení seizmické stability.

V praxi se zesílení provádí lepením kompozit v oblastech podléhajících hlavním tahovým namáháním. Ty jsou určeny odborníky během prohlídky budovy nebo konstrukce a při provádění ověřovacích výpočtů. Vyztužení stropní desky a nosníku se provádí nalepením kompozitu v nejvíce namáhaných zónách, obvykle ve středu rozpětí na spodní hraně konstrukce. (obr. 6). Pro řešení těchto problémů jsou vhodné všechny typy uhlíkových materiálů [16].



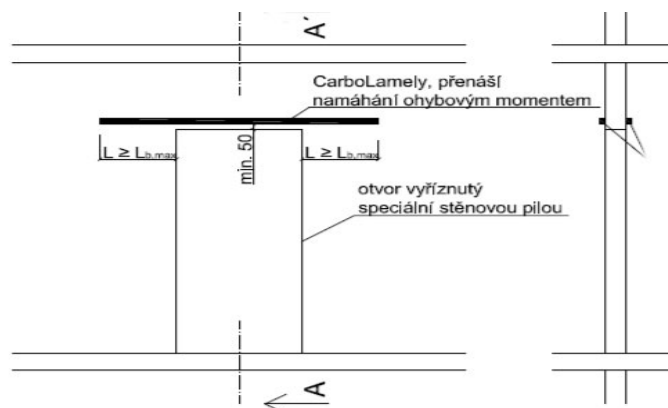
Obr.6 –vyztužení prostého nosníku, zdroj:[14].

Zesilování prvků jako jsou sloupy a pilíře pomocí vnějšího vyztužení se provádí dvěma způsoby. Pro zesílení „krátkých“ prvků ($H/b < 10$: kde: H - výška konstrukce, b - největší rozměr průřezu prvku) se používají obvazy z uhlíkových vláken (obr. 7). Druhý způsob je instalace plátna podél stlačeného prvku (obr. 7) [16].



Obr.7 –vyztužení sloupu, zdroj:[14].

Také je pomocí kompozit možné zpevnit otvory. (obr. 8)



Obr.8 –vyztužení otvoru, zdroj:[14].

V praxi je při zpevňování železobetonových konstrukcí nutné dbát na stav ocelové výztuže. Pokud by byla obnažená, vytvořily by se korozivní útvary, které je nutné zlikvidovat, protože by byla velká pravděpodobnost zničení konstrukce zevnitř. Také je při určování směru pokládky kompozitu na konsolidovaný povrch nutno vzít v úvahu směr stávající výztuže z oceli. To umožní správné rozložení sil a poskytne potřebnou pevnost [16].



2.1.2.2 Zesílení kovových konstrukcí

Kovové konstrukce jsou během provozu vystaveny působení zatížení, teploty, agresivního prostředí, v důsledku čehož dochází ke snížení únosnosti konstrukcí a trvanlivost se zmenšuje. Jedním ze způsobů, jak obnovit a případně zvýšit únosnost konstrukcí, je jejich zesílení. Pro zesílení kovových konstrukcí mohou být použity tradiční způsoby, jako zvýšení profilů prvků, instalace dalších prvků do stávající konstrukce a jiné způsoby. V posledních letech se stále více uplatňují moderní způsoby zesílení založené na použití kompozitních materiálů, a to zejména materiály vyrobené z uhlíkových vláken [16,17].

Napnuté ocelové konstrukce jsou zesíleny symetricky vzhledem k těžišti úseku. V tomto případě se používá materiál s nejvyšší pevností a nejvyšším modulem pružnosti. Montáži předchází vyčištění povrchu kovové konstrukce a nanesení lepicí vrstvy - montážního epoxidového lepidla. Po dokončení instalace se na ně aplikuje ochranná nebo protipožární vrstva a pak jsou instalována další mechanická upevňovací zařízení [16,17].

Při zesílení excentricky stlačených ocelových prvků jsou tkaniny nebo lamely rovněž instalovány symetricky vzhledem k těžišti průřezu, ale jejich asymetrická poloha je možná zejména při obnovení části poškozené korozí. V tomto případě se používá také materiál s maximálním modulem pružnosti [16,17].

2.1.2.3 Zesílení zděných konstrukcí

Existuje mnoho důvodů zhroucení kamenných staveb. Nerovnoměrné srážení půd, účinky atmosférických srážek, změny teploty, nedostatky a chyby v návrhových řešeních, nedodržování technologických a provozních norem - to vše zrychluje proces ničení. Otázka zajištění trvanlivosti kamenné konstrukce byla vždy aktuální. Zvláště při rekonstrukci historických budov, kde je klíčovým momentem zachování architektonické expresivity [18].

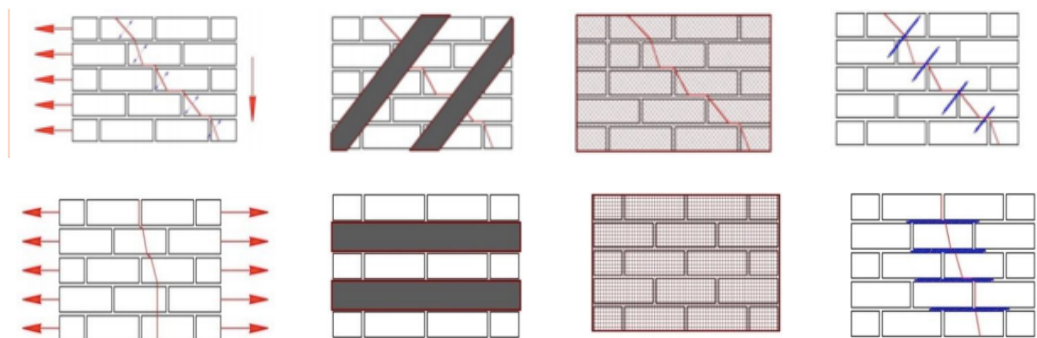
I přes účinnost zvyšování pevnostních vlastností cihel tradičními metodami, například pomocí ocelové bandáže, dochází ke změně vnější



konfigurace vyztuženého objektu. Injektování je určeno pro menší škody. Pokud je staré zdivo nahrazeno, vyztužení je doprovázeno dodatečnou namáhavou prací [18].

Technologie vyztužování zdiva pomocí UV je stejná jako u železobetonů. Zesílení se provádí na připraveném povrchu zdiva s impregnací a nánosem povrchové vrstvy. Je možné zesílit jak ohnuté struktury v roztažených zónách, tak i v oblasti působení příčných sil a stlačených a excentricky stlačených prvků. Při zpevňování zdicích konstrukcí se používají lamely, sítě a tyče [18].

Vzhledem k tomu, že zdivo má méně pevnostních vlastností v tahu, je výztuž zdiva vytvořena tak, aby nedostatečnou pevnost vyrovnávala. Hlavním principem umístění je paralelní uspořádání tahových sil. Jak je zřejmé z obrázků (obr.9), lamely a tyče jsou kolmé na trhlinu. Takže materiál zachycuje ta tahová namáhání, která zdiva neberou [18].



Obr.9 – vyztužení zděných konstrukcí., zdroj:[18].

Ve srovnání s tradičními materiály je vyztužení uhlíkovými vlákny dražší, ale je kompenzováno těmito výhodami:

- snadná instalace,
- nízká hmotnost materiálu a následně i minimální zatížení rekonstruovaných objektů,
- univerzálnost aplikace v jakékoliv formě, a proto zachování architektonického vzhledu konstrukce [18].



2.1.2.4 Zesílení dřevěných konstrukcí

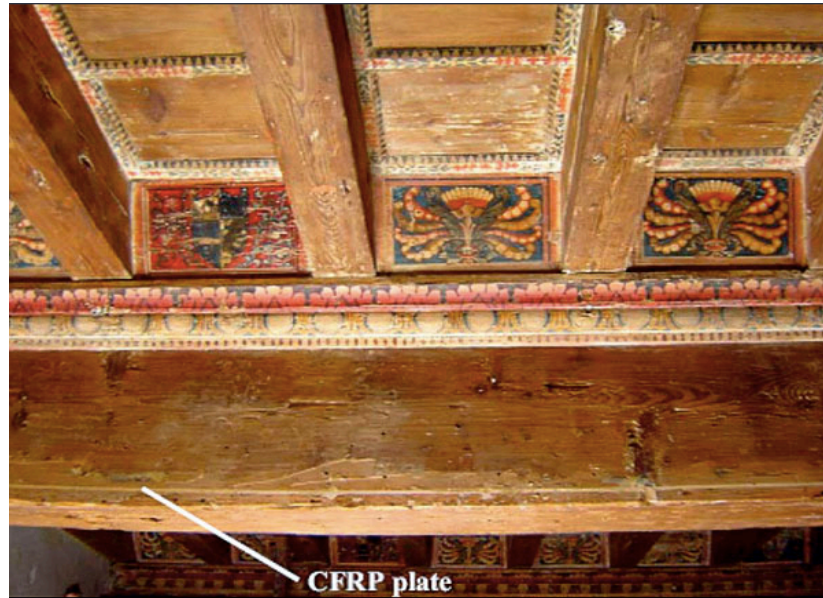
Zesilování dřevěných konstrukcí se provádí instalací prvků vnější výztuže z uhlíkových vláken. Současně se používá uhlíkové vlákno o modulu pružnosti alespoň 300 000 MPa. Montáž vnějších výztužných prvků se provádí dvěma způsoby:

- lepením na povrch,
- lepením na montážní lepidlo v předem připravených řezech [16].

Druhá metoda se používá, pokud je nutné zachovat původní vzhled konstrukce a učinit výztužení prakticky neviditelné. (obr. 10) Je výhodné dělat řezy vodorovně pro minimální narušení celistvosti průřezu [16].

Výztužné prvky jsou instalovány na místech, kde působí hlavní tahové napětí a existuje riziko rozštěpení vláken. Účinně zvyšuje tuhost lepením uhlíkových vláken v oblasti příčné síly [16].

Při zesilování dřevěných konstrukcí je kladen důraz na maximální zachování původních dřevěných prvků konstrukce. V takovém případě je také obvykle požadováno zachování vzhledu prvků (případně minimální změna tvaru). Tyto požadavky bývá běžnými metodami, na rozdíl od kompozitního řešení, obtížné splnit.



Obr.10 – vyztužení dřevěného trámu., zdroj:[18].

2.2 Použití uhlíkových vláken v mostních konstrukcích

Mosty patří k nejdůležitějším infrastrukturním zařízením. V současné době se na nosné konstrukce mostu vzhledem ke stále se zvyšujícímu zatížení a dopadům kladou mnohem vyšší nároky. Existují dva způsoby dodržování těchto požadavků, nové mostní konstrukce stavět v souladu s vyššími požadavky nebo zesilovat již existující struktury.

2.2.1 Zesílení mostní konstrukce

Hlavním kritériem pro výběr technologie rekonstrukce mostních konstrukcí je to, aby se během práce nesnížila intenzita dopravy, což by mohlo vést k zvýšeným finančním nákladům. Opravné materiály musí navíc splňovat požadavky na efektivitu, kvalitu a trvanlivost. Značná pozornost by měla být věnována odolnosti materiálu vůči účinkům chemických látek a možnosti použití pod vlivem vibrací.

Při použití tradičních technologií zesilování má použití ocelových výztuží a profilových prvků řadu nevýhod:

- zvýšení hmotnosti konstrukce,



- spárování existujících a nových prvků, pro jejichž spolupráci je třeba otevřít stávající výztužné tyče pro svařování nových,

- ocelové prvky výztuže jsou náchylné ke korozi, a proto vyžadují další práci na ochranu proti korozi a systematickou opravu antikorozního povlaku [21].

Aby se zvýšila únosnost a provozuschopnost a zároveň se snížily provozní náklady a náklady na dopravu, mohou být pro zesílení použity kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken, které mají vynikající fyzikálně-mechanické vlastnosti. Pro opravu se používají kompozitní materiály rozdělené do dvou hlavních skupin: tkaniny a lamely, které byly zmíněny v předchozí kapitole [21].

Použití uhlíkových vláken při zesílení mostové konstrukce má ve srovnání s tradičními materiály a metodami následující výhody:

- nezatěžuje konstrukci,
- podstatně nemění geometrii konstrukce,
- mají vysokou pevnost a vytrvalost,
- vysoká odolnost vůči agresivním vlivům prostředí,
- odolnost vůči korozi,
- materiál je vhodný pro zesílení jakékoli formy struktury,
- méně pracnosti [21].



Obr.11 – Zesilování mostu pomocí kompozitních materiálů., zdroj: [21].

2.2.2 Počáteční výztuž mostních konstrukcí s materiály na bázi uhlíkových vláken

Desku povlaků používají často v posledních desetiletích konstruktéři mostů z kovových ortotropních desek. Jejich využití umožnilo snížit náklady na stavbu zjednodušením montáže konstrukčních prvků mostu, jejich dodáním na stavbu, zvýšením délky rozponů (umožnilo snížit počet podpěr) [22].

V době úspěšného používání ortotropní desky v různých provedeních bylo vytvořeno mnoho standardních řešení, která jsou stále používána po celém světě. Využití této technologie umožnilo při omezené době výstavby vybudovat prvotřídní mosty s prodlouženou životností a obrovskými rozměry. Typickým představitelem této technologie stavebních mostů je most Golden Gate v San Franciscu [22].



Další etapou byla konstrukce blokových (prefabrikovaných) ortotropních desek. Tento způsob dovolí vyrábět blokovou strukturu před začátkem výstavby, a tak se stal určujícím faktorem pro ekonomické zlepšení účelnosti. V praxi vykazuje využívání ortotropních desek stejné nedostatky. Je nutná pravidelná kontrola a údržba. Stárnutí kovu a jeho koroze může vést k prudkému zhoršení požadovaných a navržených vlastností mostu, což může vést k nevratné katastrofě a obětem [22].

Myšlenka použití uhlíkových vláken v původní konstrukci počítá s nahrazením kovové ortotropní desky kompozitním materiálem na bázi uhlíkových vláken. Deska vyrobená z kompozitních materiálů může mít všechny výhody konstrukcí kovových desek vzhledem k „předem nastavitelným“ vlastnostem kompozitů, je třeba ale odstranit jejich nedostatky. Použití této ortotropní desky sníží váhu konstrukcí, což sníží zdvihací mechanismy a protizávaží na zvedacích mostních systémech [22].

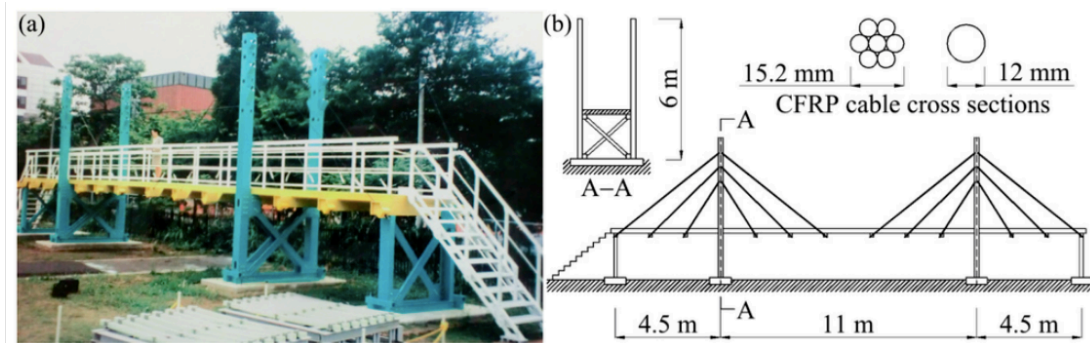
Některé konstrukce z plastových kompozitních materiálů je možné přesunout ručně nebo pomocí malé mechanizace. Lehkost samotných konstrukcí usnadní dodávky na těžko dosažitelné stavby. Teplotní roztažnost kompozitního materiálu je minimální, takže je možné zcela nebo částečně vyloučit dilatační spáry. Rozpětí mostů z kompozitních materiálů může být větší a spolehlivější. Vzhledem k vlastnostem materiálu se sníží náklady na zpracování a ochranu nátěrových hmot a antikoročních nátěrů. Konstrukce těchto mostů snižuje náklady na provoz. V důsledku toho je použití kompozitu ekonomicky výhodné, a to zejména u mostů s velkým rozpětím, kde je vyžadována snadná údržba nebo její absence [22].

Částečná nebo úplná výměna některých prvků je aktivně zahrnuta do světové praxe. Například v USA byl první kompozitní silniční most instalován v listopadu 1996 v Kansasu. Během výstavby byly použity lehké jeřáby a mostní prvky byly vyrobeny v továrně. Kompletní instalace trvala přibližně 10 hodin [23].

Vysoká pevnost v tahu a tuhost, stejně jako vysoká životnost při únavě, nízká hmotnost a vynikající chemická odolnost umožňují použít tento kompozit

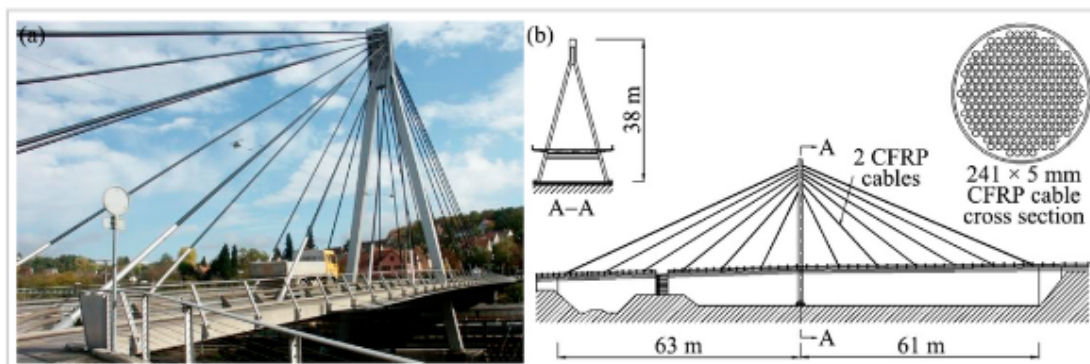


u zavěšených mostů, a to jako náhradu za ocelová lana [22]. Například první podobný most byl postaven v Japonsku. Tato struktura, která se nachází v Ibaraki v Japonsku, byla navržena "Public Works Research Institute" v Tsukubě a dokončena v březnu 1996 (obr.12). [24].



Obr.12 – Tsukuba FRP most, (a) foto (fotografie: Iwao Sasaki) a (b) skica, zdroj:[24].

Dalším příkladem je Stork Bridge. Stork Bridge je první dálniční zavěšený most s CFRP lany ve světě. Tento most se nachází ve městě Winterthur ve Švýcarsku a byl navržen společností OMG a partnerskými architekty AG a Höltschi & Schurter AG. Tento most byl dokončen a otevřen k provozu 27. října 1996 [24].



Obr.13 – Stork Bridge, (a) foto a (b) skica, zdroj:[24].

2.3 Beton vyztužený uhlíkovými vlákny

Vědci z Technické univerzity v Drážďanech nahradili kovovou výztuž v betonu textilní, která je vyrobena na bázi uhlíkových vláken. I přes zdánlivou jednoduchost tohoto vynálezu na něm chemici pracovali několik desítek let



a chtěli dosáhnout toho, aby se textilní uhlíková vlákna spojila s betonovou směsí. Proto ho ošetřují speciální vrstvou, jejíž složení je výrobcem utajeno.

Technologie se skládá z vrstvení textilního materiálu na beton a následného nalévání. To znamená, že vrstva směsi je proložena textiliemi naplněnými tenkou vrstvou betonu, a to až do dosažení požadované tloušťky [25].

K výhodám uhlobetonu patří v porovnání s železobetonem lehkost, pevnost, žádná koroze výztuže a následně i trvanlivost [25].

V současné době se tento materiál používá ve dvou oblastech: rekonstrukce starých budov a výstavba nových.

2.3.1 Výstavba nových budov

V současné době byly na základě tohoto materiálu provedeny dvě konstrukce. První je pavilon (obr. 14).



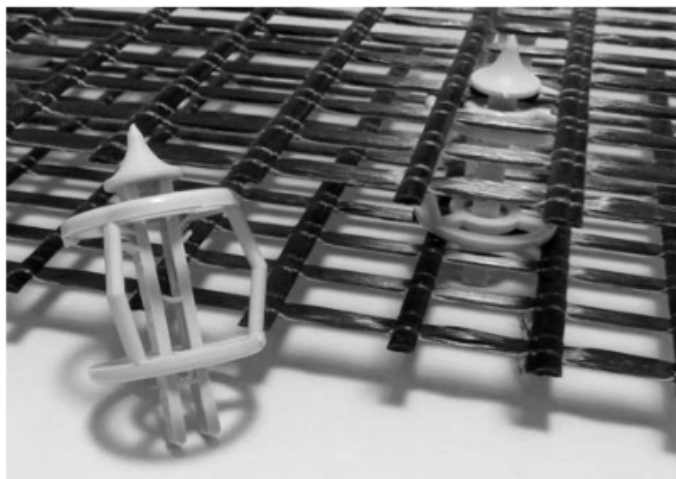
Obr.14 – TRC konstrukce ze šesti odlitých součástí, zdroj:[25].

Cílem tohoto projektu bylo vytvoření budovy z prefabrikovaných TRC prvků, které lze montovat a demontovat tak často, jak chcete. Prvek, který byl vyvinut, měl podél dvou největších okrajů délku 5 m a na základně rozměr 70 cm. Tloušťka betonové konstrukce byla v projektu navržena pouze 4 centimetry. To stačilo pro začlenění dvou potřebných vrstev uhlíkových textilií [25].



Pro zahájení bylo nutné vyvinout tekutý, samozhutnitelný jemně zrnitý beton (s maximální velikostí zrn 1 mm). Navíc musel být beton snadno čerpán a mít nízké smršťovací vlastnosti. Beton pro pavilon měl obsah pojiva cca 800 kg/m³ a obsah písku (~ 1000 kg/m³). Množství vody bylo (~ 270 kg/m³) [25].

Jako výztuž byla vybrána biaxiální CFHT mřížka. Vlákna měla v obou směrech vzdálenost 10,8 mm. Před odlitím betonu byly předřezané uhlíkové textilie umístěny horizontálně a upevněny plastovými distančními prvky na horní ploše bednění. Vývoj těchto prvků byl součástí projektu, protože v tomto okamžiku nebyl na trhu k dispozici žádný podobný systém [25].



Obr. 15 – distTEK: speciální rozpěrky pro textilní mřížky, zdroj:[25].

Pro připojení prvků byly předem prozkoumány různé varianty. Připojení by mělo umožnit vícenásobnou montáž a demontáž. Nejvhodnější pro tuto aplikaci byly ocelové profily L nebo T, které byly během lití betonovány na okrajích prvků. Opačné příruby byly našroubovány. Kontaktní plochy ocelových dílů byly prováděny různými způsoby. Některé byly navíc nalepeny cementovou maltou, jiné byly jednoduše sestaveny bez jakéhokoliv lepidla. Výkon obou metod bude zkoumán pomocí následného dlouhodobého sledování [25].



2.3.2 Rekonstrukce

Kromě výstavby nových konstrukcí má TRC obrovský potenciál pro použití při zesilování konstrukcí. Tato metoda přináší výhody, jako je vysoká produktivita a optimální konsolidace betonu. Prvním realizovaným projektem v Německu bylo zesílení velké střechy, která měla podobu hyperbolického paraboloidu na Univerzitě aplikovaných věd ve Schweinfurtu v roce 2006.

Střecha má rozměry 28×28 m. V blízkosti okrajů pláště došlo k neakceptovatelným deformacím. Vzhledem k tomu, že stavba je chráněná budova, nebyla demolice stávající struktury a nahrazení novou stavbou možná. Stejně tak nebylo možné použít metody, které by zvýšily váhu konstrukce [25].

Takové stavební opatření se obecně provádějí podle následujícího schématu.

Především musí být povrch vyčištěn: staré části betonu musí být odstraněny a trhliny musí být utěsněny. Před nanesením první betonové vrstvy musí být povrch vyčištěn od prachu, zdrsňen a rovnoměrně navlhčen, aby se zajistilo dobré spojení mezi starým a novým betonem. Poté lze použít jemný beton a textilní výztuž. Horní betonová vrstva může být vyhlazena nebo tvarována do požadovaného profilu povrchu. Ve Schweinfurtu stačila 1,5 cm tenká TRC vrstva, obsahující tři vrstvy textilií z uhlíkových vláken, aby posílily plášť. To bylo dostatečné pro zajištění únosnosti a zabránění dalším deformacím. Trvalo jen několik dní, než byla zesílena celá struktura. Obrázek 16 znázorňuje proces zesilování popsany výše [25].



Obr.16 – zesilování střechy , zdroj:[25].

2.4 Konstrukční prvek

V posledních deseti letech začal být CFRP používán nejen k zesílení konstrukcí. Jak již bylo řečeno dříve, ve světě je na základě tohoto materiálu postaveno několik mostů. Kromě infrastrukturních zařízení se však materiály založené na uhlíkových vláknech objevily i v jiných oblastech stavebnictví. Díky své nízké tepelné vodivosti, vysoké pevnosti a nízké hmotnosti je tento materiál stále častěji používán jako náhrada za konstrukční elementy. Navíc se v poslední době začínají vědci stále více zabývat otázkami úniků škodlivých emisí do atmosféry.

Stavební průmysl se každým rokem vyvíjí. Pro jeho potřeby je zapotřebí více materiálů, jako je cement. Jen v období od roku 1930 do roku 2013 bylo vyrobeno asi 76 miliard tun cementu, což vedlo k uvolnění 38,2 gigatun oxidu uhličitého do atmosféry [26]. Použití CFRP v konstrukcích problém nevyřeší, ale může ho výrazně snížit.

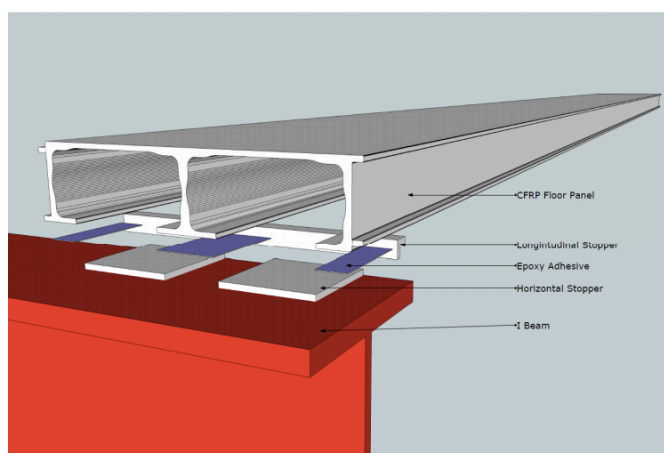
2.4.1 Podlahový systém CFRP

Princip daného systému je jednoduchý. Profily CFRP jsou vyrobeny dle předem určených rozměrů v továrně a potom jsou instalovány na místě stavby. Tento profil je vidět na obrázku č. 17.

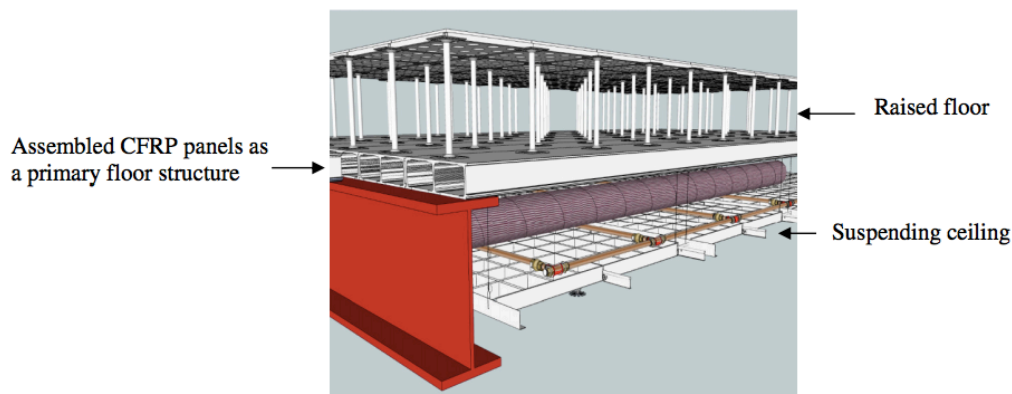


Obr.17 – CFRP panel a pohled v příčném řezu, zdroj:[27].

Daný panel je jednosměrným nosníkem s otevřeným průřezem, který se skládá ze tří částí a tří pasů. Uhlíková vlákna jsou situována podél délky nosníku, což napomáhá ke značné odolnosti vůči průhybům. Tento panel je podepřen buď ocelovým či betonovým nosníkem, s kterými je spojen lepenými nebo mechanickými spoji(obr.18). Profil CFRP má dvě obdélníkové buňky otevřené ze spodní části, které poskytují snadnou integraci systémů vytápění, chlazení, hašení a osvětlení pomocí závěsného stropního systému(obr.19) [27].



Obr.18 –Spojení, zdroj:[27].



Obr.19 – Systémy podlahových panelů CFRP, zdroj:[27].



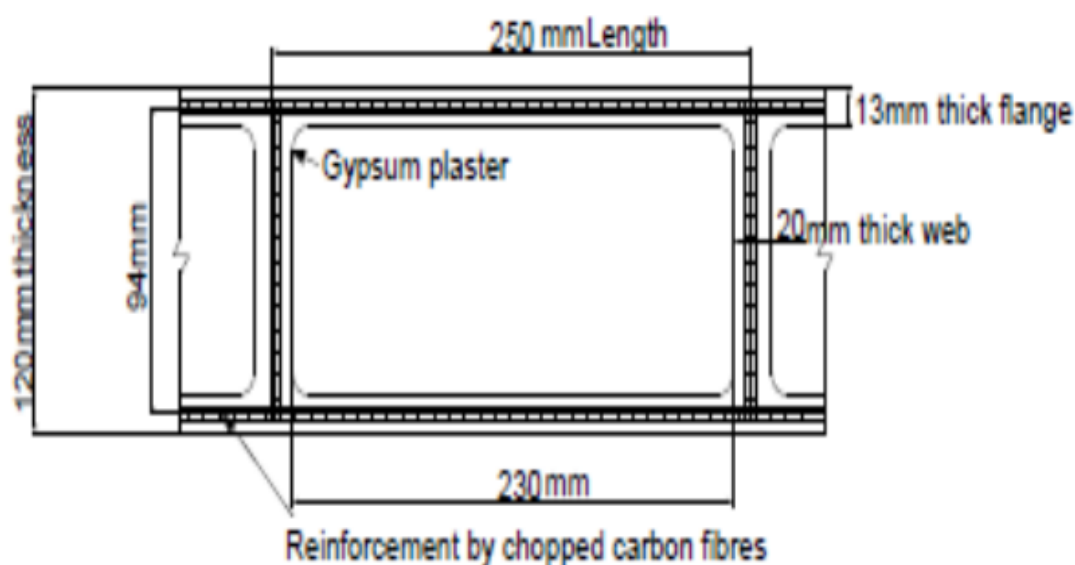
Použití tohoto systému má následující výhody. Hmotnost podlahové desky činí 10 % hmotnosti železobetonu, což výrazně snižuje zatížení. V důsledku toho je možné snížit množství materiálu v konstrukcích a základech budov. Tento systém umožňuje také rychlou instalaci. Úspory energie jsou rovněž důležitým faktorem, protože CFRP je méně náročné na vytápění. Ready Homes Enterprises, USA (2002) shrnul, že dům FRP by mohl ušetřit 50–70 % topné energie ve srovnání s tradičním domem a snížit emise CO₂ o nejméně 50 %. Kromě toho zanechává stavba pomocí tradičních materiálů velké množství odpadů, které jsou jen občas recyklovatelné. CFRP podlahové komponenty mohou jejich množství snížit. V souvislosti s těmito výhodami by mohl být ekonomický aspekt užívání materiálu odůvodněn. Kompozit má však dvě nevýhody, které byly zmíněny již dříve. Za prvé je materiál FRP křehký a jeho odolnost proti nárazu je nízká. Za druhé je relativně nízká i jeho požární odolnost. Tyto problémy lze však řešit instalací sekundárních konstrukcí, zvýšenými podlahovými a zavěšovacími stropními systémy (obr.19) [28].

2.4.2 CFRG

Další materiál, ve kterém je použito uhlíkové vlákno je CFRG. Je to sádra vyztužená uhlíkovým vláknem. Velkou popularitu získal tento materiál v Indii. CFRG dokázalo uspokojit poptávku po rychlém, energeticky úsporném budování. Díky mechanickým vlastnostem uhlíkového vlákna a sádrových kompozitů se stal dobrým řešením pro tento seizmicky aktivní region.

Ve většině případů se tyto panely využívají jako nosná zeď. V kombinaci s tradičními stavebními materiály je vhodné je použít i jako stropní desky [29].

Podle stavebního výkresu musí být každý panel plně připraven v továrně včetně průřezu oken, dveří a jiných TZB. Před instalací panelů vyznačí tým geodetů na základní desce linie. V souladu s vyznačenými panely se instalují na určená místa pomocí jeřábu. Dále následuje stabilizace a ukotvení [29].



Obr.20 – Průřez panelu CFRG, zdroj:[29].

Na základě statiky mohou být panely vyztuženy ocelí a pak zaplněny betonem. Po instalaci stropní desky mohou být stabilizační opěry odstraněny, minimálně však po čtyřech dnech. Poté začínají dokončovací práce [29].

Dále je uvedeno porovnání dvou stejných objektů v Indii, z nichž jeden byl vybudován tradiční metodou a druhý s použitím uhlíkového vlákna.

Tab.3 – Porovnání CFRG a tradiční metody vystavby. Zdroj: [29].

<i>Materiály</i>	<i>CFRG</i>	<i>Konvenční</i>	<i>Úspora %</i>
<i>Cement</i>	16 tun	32,55 tuny	50,8
<i>Ocel</i>	1800 kg	2779 kg	35,2
<i>Cihly</i>		57200 ks	
<i>CFRG panely</i>	500 m ²		
<i>Voda</i>	50000 l	200 000 l	75
<i>Zastavěná plocha</i>	143 m ²	154,45 m ²	8

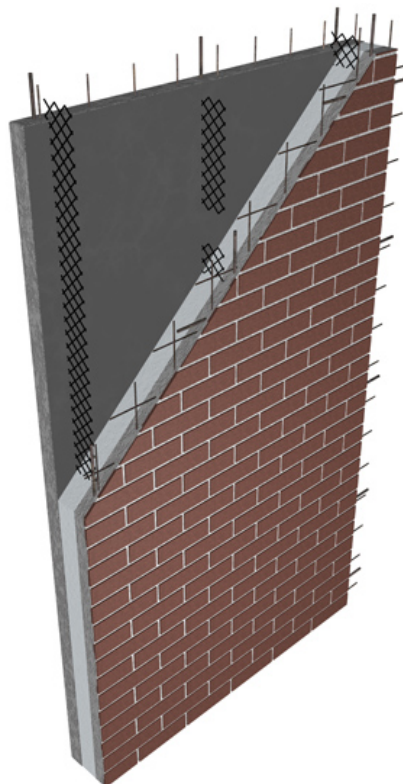


<i>Práce</i>	389 směn	1200 směn	67,59
<i>Doba výstavby</i>	21 dní	120 dní	82
<i>Celková hmotnost</i>	170 tun	490 tun	65
<i>Cena</i>	2057000 rupií	1827000 rupií	
<i>Energie kWh</i>	82921	215400	61,5

2.5 Další využití uhlíkových vláken ve stavebnictví

2.5.1 Výztužná síť

Výztužná síť z uhlíkových vláken je náhradou vedlejší ocelové výztužné sítě v betonových panelech. Rozměr sítě se mění v závislosti na betonu, na typu vyplnění a v závislosti na pevnostních požadavcích. Síť, která je kolmá k povrchu panelů spojuje vnitřní a vnější opláštění, čímž se zlepšují smykové vlastnosti. Použití této technologie snižuje váhu panelu. Kromě toho se používá uhlíkové vlákno s nízkou tepelnou vodivostí, čímž se zlepšují izolační vlastnosti [30].



Obr.21 – Výztužná síť stěnového panelu z uhlíkových vláken, zdroj:[30].

2.5.2 Ochrana proti zemětřesení

V Japonsku byl vynalezen nový termoplastický kompozit z uhlíkového vlákna s názvem CABKOMA Stand Rod. Daný kompozit je obklopen syntetickými vlákny a je povlečen termoplastickou smůlou. Roleta takového materiálu o délce 160 metrů váží jen 12 kilogramů, kovová konstrukce s podobnými vlastnostmi bude vážit 4 až 5krát více [31]

Pro seizmický projekt byly tyče vloženy do ložisek, na střešní konstrukci a na zemi. Tyče byly také použity uvnitř interiéru, zejména pro vytváření ztužujících stěn. Výsledkem je, že vzhled budovy vypadá, jako by ji podpíraly stovky nití, ale má sílu odolávat zemětřesení. Vývojáři prohlašují, že takový projekt lze provést pouze díky dnešním počítačům. Dokážou s jejich pomocí spočítat, kolik takových tyčí je zapotřebí na ochranu proti zemětřesení [31]



Obr.22 – Budova Komatsu Seiren v Japonsku s tyče z uhlíkových vláken jako seizmická výztuž., zdroj:[31].

3.Rekonstrukce Nemocnice Hořovice

3.1 Vymezení problému a cíl práce

Pro praktickou část byl zvolen objekt, kde byla výztuž provedena pomocí lamel z uhlíkových vláken. Na začátku sestaví autor technologický návrh pro výztužnou technologii s použitím kompozitních materiálů z uhlíkových vláken. V souladu se skutečností, že je objekt velmi starý, bude před vyztužením nutné provést práci na obnovení krycí vrstvy trámů. Dále se autor rozhodl vyhodnotit toto řešení a pro srovnání nabídl dvě alternativy, které by mohly být použity. První alternativou je použití tradiční metody zesílení, a to právě zvýšení profilu pomocí přídatné výztuže a torkretování. Další alternativní metodou je vyztužení pomocí helikální (spirálové) výztuže, kde úlohu dodatečné výztuže zajišťuje speciální nerezová ocel, která je vložena do připravených drážek.

Cílem praktické části je porovnat techniky zesilování z různých úhlů pohledu, jako jsou finanční, technologická a časová náročnost. Ve své práci navazuje autor na díla takových autorů jako Lipták Tibor a Tomáš Vaněk, v knihách, kde jsou popsány různé typy zesilování struktur, příklady jejich využití, jejich výhody a nevýhody. Velké množství informací čerpal autor z



technických listů různých výrobců. Na základě toho byly vybrány následující technologie.

3.2 Technologický předpis

3.2.1 Základní údaje stavby



Obr.23 – Nemocnice Hořovice., zdroj: internet.

Název stavby: rekonstrukce nemocnice Hořovice,
K Nemocnici 1106
268 01 Hořovice
Česká republika

Jedná se o železobetonový skelet o 1 podzemním a 2 nadzemních podlažích. Pod 1. PP je provedeno technické podlaží. Konstrukční výška je v 1. PP 4,02 m a 1. a 2. NP 3,6 m. Obvodový plášť je tvořen cihelnou vyzdívkou. Vodorovné nosné konstrukce jsou tvořeny železobetonovou trámovou deskou. Po obvodu konstrukce a ve středním sloupovém pruhu jsou průvlaky o rozměrech 570×500 mm. Průvlaky jsou považovány za spojitý nosník. Trámy jsou vedeny příčně a mají rozměr 320×160 mm. Trámy jsou považovány za spojitý nosník o dvou polích délky 4,8 a 5,95 m (světlý rozměr). Osová vzdálenost trámů je od 1 m do 1,22 m. Přes trámy je položena stropní deska o tloušťce 60 mm. Deska je jednosměrně pnutá a je považována za spojitou.

Na namáhání ohybovým momentem byly posuzovány stropní deska,



stropní trámy a střední průvlak. Z uvedeného posouzení vyplývá, že stropní deska a průvlak vyhovují. Trámy v delším poli nevyhovují a v kratším poli vyhovují s malou rezervou únosnosti. Trámy je tedy nutné zesílit. Krycí vrstva při spodním líci trámu není na většině plochy soudržná s konstrukcí [viz. Příloha č. 2].

3.2.2 Vymezení předmětu řešení

Jedná se o dodatečné zesílení konstrukce pomocí kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken. Před zesílením budou prováděny práce na sanaci trámů pomocí speciálních malt. Dále se aplikují lamely z uhlíkových vláken, které budou nalepeny na spodní část rekonstruovaných trámů pomocí epoxidového lepidla.

3.2.3 Vstupní materiály a výrobky

Rekonstrukce podkladu

V souladu se skutečností, že trámy jsou velmi staré a na většině míst má krycí vrstva na spodní straně nízkou přilnavost ke konstrukci, je nutné obnovit trám před vyztužením. K obnovení potřebujeme:

- inhibitor koroze, kterým se natírá odhalená výztuž (Omnitek Micin)
- spojovací můstek, který zajistí udržení redukční vrstvy (ResiBondSP)
- speciální regenerační cementovou maltu (ResiBond Max)

Množství materiálů, které by se mělo pro tuto práci objednat, je uvedeno v následující tabulce. Sada obsahuje koeficient ztráty.

Tab.4 –Množství materiálů pro rekonstrukce podkladu. Zdroj: autor.

Název	MJ	Množství
Inhibitor koroze	kg	44,94 ¹
Spojovací můstek	kg	6,74 ²
Cementová malta	kg	2156,88 ³

¹V souladu s výkresy [viz příloha č. 2] je délka prvního trámu 4,8 m a délka druhého 5,95 m. Po celé délce jsou čtyři tyče o průměru 14 mm. Spotřeba inhibitoru je přibližně 0,05 kg/m. Takových rozpětí je 19.



²Spotřeba je přibližně 0,3 kg/m².

³Spotřeba je 22 kg/m² při tloušťce 10 mm [14].

Zesílení pomocí UV

Pro zpevnění lamelami z uhlíkových vláken budou potřeba lamely a epoxidové lepidlo. Níže jsou tabulky s mechanickými vlastnostmi a množstvím materiálu, který bude při aplikaci na tento objekt potřeba.

Tab.5 – Vlastnosti CFRP lamely. Zdroj: [14].

CFRP lamela (Stado Carbo ® Lamely - typ S)	
<i>Tloušťka [mm]</i>	1,4
<i>Objemová hmotnost [g/ cm³]</i>	1,6
<i>Šířka[mm]</i>	50 100
<i>Laminární smyková pevnost [Mpa]</i>	60
<i>E-modul pružnosti [kN/mm²]</i>	170
<i>Pevnost v tahu [N/mm²]</i>	3000

Tab.6 – Vlastnosti lepidla CarboResin. Zdroj: [14].

<i>Smršťování [%]</i>	0,04
<i>Hustota (natužená směs)[g/cm³]</i>	Cca 1,65
<i>E-modul[Gpa]</i>	v tlaku: 7,8
<i>Pevnost v tlaku[Mpa]</i>	85
<i>Pevnost v tahu[Mpa]</i>	26
<i>Pevnost ve smyku[Mpa]</i>	13
<i>Součinitel teplotní roztažnosti[K⁻¹]</i>	32 x 10 ⁻⁶

Tab.7 – Množství materiálů pro zesílení pomocí CFRP lamel. Zdroj: autor.

Název	MJ	Množství
CFRP lamela š. 50 mm	m	91,2
CFRP lamela š. 100	m	113,05
Epoxidové lepidlo	kg	71,05 ¹

¹Spotřeba lepidla 350 g/m při tloušťce lamely 50 mm [14].

3.2.4 Zásady manipulace, dopravy a skladování materiálu

Lamely:



Doprava pouze v originálním balení nebo jinak vhodně chráněno před mechanickým poškozením. Doba trvanlivosti neomezená, pokud jsou splněny podmínky skladování. Skladování v originálních, neotevřených a nepoškozených obalech, v suchu a mimo dosah slunečního záření. V těchto podmínkách je životnost lamel neomezená. Nedoporučuje se rozdrcovat, lámat nebo ohýbat lamely, což může vést k nevratným deformacím a jejich další použití pak nebude možné.

Lepidlo:

S lepidlem je nutné manipulovat opatrně, aby se zabránilo poškození obalu, a tím vniknutí vlhkosti a ztrátě požadovaných vlastností. Doprava a skladování v originálních uzavřených obalech v chladu a v suchu, mimo přímé sluneční záření, složka A oddělena od složky B. Musí být chráněno před mrazem. Životnost výrobku za těchto podmínek je minimálně 12 měsíců od data výroby.

Malta/inhibitor/spojovací můstek:

Stejně jako lepidlo musí být skladována pod zakrytím, ne přímo na zemi a také chráněna před zdroji vlhkosti a mrazu.

3.2.5 Metody kontroly kvality materiálu

Před převzetím výrobků je nutné zkontrolovat, zda se jedná o objednaný materiál. Vizuálně se zkontroluje, zda nejsou porušeny obaly. Je nutné zkontrolovat datum výroby pojiva. Případná reklamace musí být řešena okamžitě. Při vadách dodaného materiálu se převezme pouze neporušená část a sepíše se protokol. Dodavatel stavebního materiálu je povinen dodat certifikáty a osvědčení o shodě CE podle českých a evropských norem a bezpečnostní listy.

3.2.6 Přípravenost pracoviště

Pracoviště přebírá pracovní četa, která bude provádět vyztužení. Na místě provedení musí být zajištěna voda a elektřina. Také by mělo být na



staveništi připraveno dostatečné množství materiálu, lepidla a stavebních nástrojů. Povrch, na který mají být CFRP lamely aplikovány, musí být vyčištěn od prachu a jiných nečistot.

3.2.7 Struktura pracovní čety

Obnova betonu bude prováděna četou nejméně 2 osob, z nichž jeden bude pracovat jako obsluha stroje, další může být dělník, který je s procesem seznámen. Stavební tým pro provádění vnější výztuže konstrukce pomocí lamel z uhlíkových vláken se bude skládat nejméně ze tří pracovníků. Důvodem je především velikost rozpětí a práce v neobvyklé pozici. Operace dodatečného vyztužení jsou strukturální a musí být prováděny zkušenými odborníky. Pracovníci, kteří budou provádět zesilovací práce, jejich dozor a inspektoři, by měli být o používání těchto materiálů vhodně proškoleni. Zaměstnanci by měli obdržet doklad o absolvování takového školení.

3.2.8 Bezprostřední podmínky pro práci

Technologická činnost lepení výztužných prvků by měla probíhat při teplotě okolí cca od +10 °C do +30 °C.

Podklad připravený pod lepení výztužných prvků by měl mít teplotu vyšší o 3 °C než je teplota rosného bodu, a nikoli nižší než +12 °C. Pokud se toto pravidlo nedodrží, na povrchu konstrukce vznikne kondenzát a lamela ztratí potřebnou přilnavost k povrchu. Rovněž je nutné regulovat obsah vlhkosti povrchu, která nesmí být vyšší než 4 %. Pokud vlhkost povrchu neodpovídá požadované teplotě, je nutné zvýšit pokojovou teplotu nebo zvýšit její ventilaci.

3.2.9 Stroje a přístroje, pracovní pomůcky

Mechanismy pro přípravu podkladu:

Rotační fréza, ocelové rotační kartáče, brokové tryskače, otryskávání abrazivem, pemrlovací přístroje, vysokotlaká vodní pistole, torkretovací přístroj, přístroj pro odtrhovou zkoušku (obr. 24).

Pomocné prostředky:

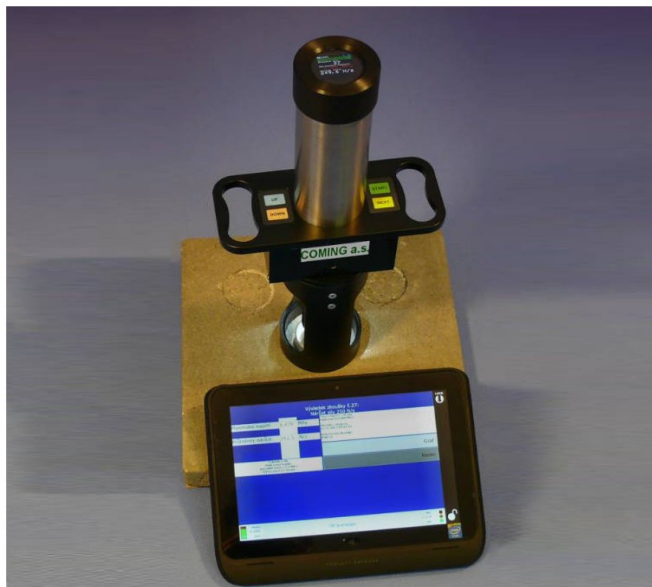
Vrtačka s nízkými otáčkami (max. 500 ot/min) – pro míchání lepidla, nástavec do vrtačky pro míchání lepidla, gumový váleček, korýtko pro



nanášení epoxidového lepidla, špachtle, řezný kotouč pro řezání lamel, lešení, vysavač pro odstranění prachových částic, ocelová lať (2 m) pro kontrolu, zda je povrch rovný, ocelový kartáč (pro lokální očištění výztuže), pracovní stůl.

Ochranné prostředky pro BOZP:

Gumové rukavice, ochranné brýle, ochranný oděv, ochranná přilba, respirátor.



Obr.24 – Odtrhoměr COMTEST@OP3 ,zdroj: [32].

3.2.10 Technologický postup doplněný postupovým diagramem

V souladu se skutečností, že uhlíkové vlákno a související technologie jsou hlavními v této práci, bude podrobně krok za krokem popsána technologie zesílení pomocí uhlíkových lamel. Na konci odstavce uvede autor postupový diagram. Organizace vnějšího výztužného systému by měla zahrnovat následující technologické operace:

- příprava povrchu konstrukce,
- příprava výztužných prvků,
- příprava adheziva,
- lepení výztužných prvků.

Rekonstrukce trámů



Při vyztužení lamelami z uhlíkových vláken je třeba se ujistit, že povrch, který má být vyztužen, má ke konstrukci dobrou přilnavost. Krycí vrstva na více místě buď zmizela, nebo má nízkou míru soudržnosti, takže autor navrhuje, aby byly před zesílením prováděny restaurátorské práce. Především bychom měli začít podepřením úseků, které budou později obnoveny. Dalším krokem bude odstranění horní vrstvy betonu za účelem odhalení výztuže pomocí proudu vody pod tlakem 60–150 MPa. Zbývající znečištění povrchu a výztuže musí být také vyčištěno, a to rovněž vodou pod tlakem. Po čištění musí mít pruty kovový lesk. Poté se výztuž otírá speciálním inhibitorem koroze. Ke zvětšení uchopení další vrstvy se provede spojovací můstek. Konečným krokem bude reprofilace trámu speciální cementovou maltou. V důsledku velkého množství práce navrhuje autor metodu strojního nástřiku. Je nutné sledovat výplň mezer mezi pruty. Stojky budou odstraněny pouze z míst, kde se práce bude odehrávat. Lze je odstranit pouze tehdy, když zesílení pomocí kompozit vstoupí v platnost.

Příprava podkladu

Před začátkem zesílení pomocí kompozitu, by měl podklad, který byl reprofilován, vyžrát. Technologický předpoklad mezi těmito procesy závisí na velkém množství faktorů, například na teplotě a vlhkosti místnosti. Velký vliv má také použitý materiál. Na základě technických informací malty, která byla použita (viz. spotřeba materiálu), je třeba počkat nejméně 24 hodin. Povrch, na který mají být lamely lepeny, musí být čistý. Otryskacím pískem budou odstraněny všechny nečistoty. Poté se povrch zkontroluje na nerovnosti pomocí 2 m latě. Maximální přípustná odchylka je ± 20 mm přes, do vzdálenosti 2 m v jakémkoli směru.

Navíc by měla k použití tohoto materiálu být speciálním zařízením kontrolována odtrhová pevnost betonu (obr.24). Na povrch připraveného základu je nutné nanést křídové linie v souladu s konstrukčním řešením výztužných prvků. To napomůže rychlejšímu a přesnějšímu nalepení lamel.

Zesílení pomocí uhlíkových lamel

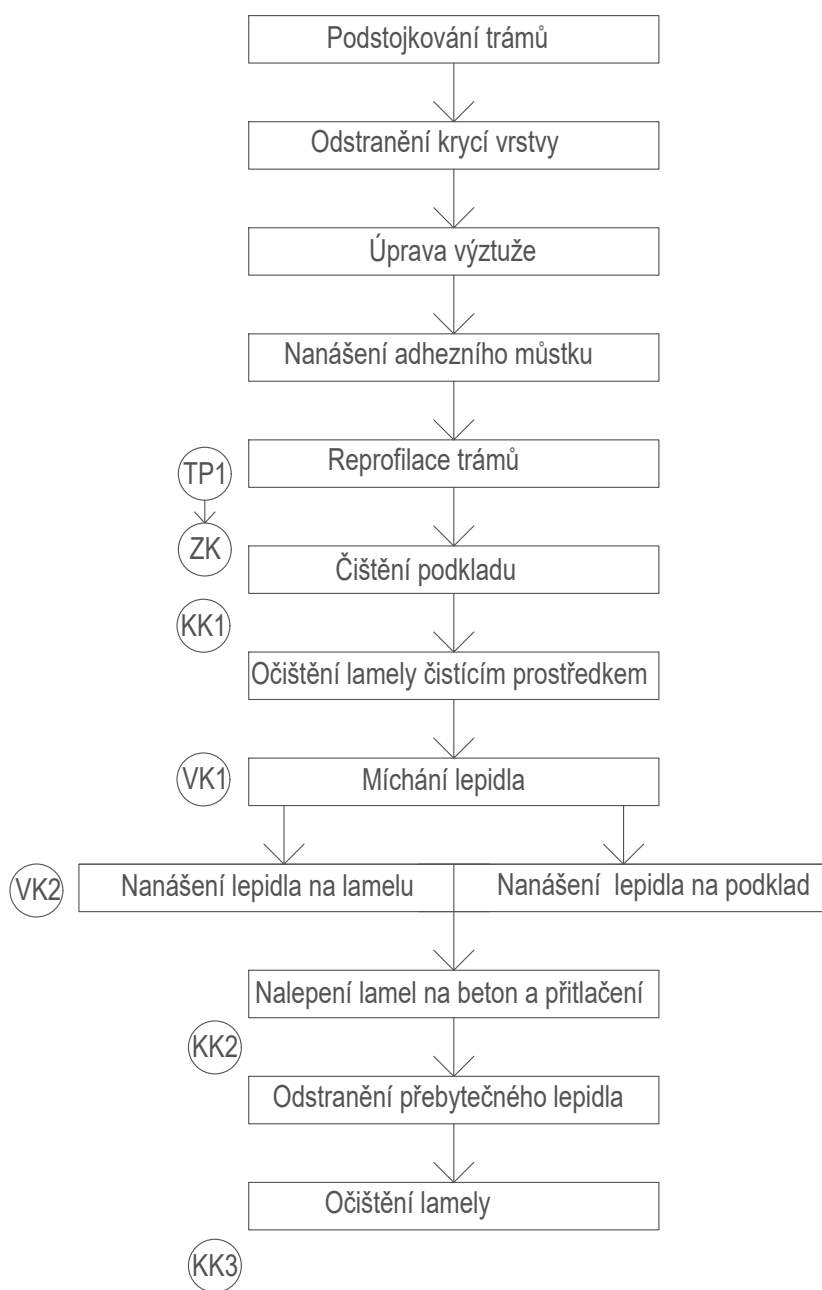
Příprava vyztužovacích prvků musí být prováděna ve výrobní továrně a řezání pásku musí být na požadované rozměry v souladu s konstrukcí.



Řezání probíhá na speciálním hladkém stole, který je pokryt polyethylenovou fólií. Řezané polotovary jsou srolovány do role, ke které je připojena poznámka, která udává rozměry a počet polotovarů. Poté se kotouče umístí do speciální obalové nádoby a dodají se na místo jejich použití. Za přítomnosti speciálních nástrojů lze řezat přímo na staveništi, ale to může znamenat poškození materiálu a větší objem provedené práce. Lamely mají jednu stranu hladkou a druhou zdrsňenou. Na zdrsňené straně by měl být film. Před nanesením spojovacího prvku musí být strana s filmem důkladně vyčištěna navlhčeným hadříkem. Právě touto stranou se bude kompozit lepit na povrch konstrukce. Lepidlo je dvousložkové, připravuje se ze složky A a složky B. Složku B je nutno promíchat a přidat ke složce A. Složky musí být stejnoměrně promíchány nízkou rychlostí elektrickým šroubovým míchadlem při nízkých otáčkách max. 500 ot/min. Míchání by se mělo provádět nejméně 2 minuty před vznikem stejnorodé směsi. Aby se zabránilo výskytu vzduchových bublin, je zakázáno zvedat míchadlo ze směsi za míchání. Trvanlivost lepidla je přibližně 40 minut při teplotě 25 °C. Proto by množství lepidla nemělo překročit technologické možnosti jeho použití do 20 minut. Dávkovací komponenty A a B se přidávají zvážením každého komponentu zvlášť.

Lepidlo se nanáší špachtlí na vyčištěný povrch betonu. Vrstva by neměla přesáhnout 1 mm. Poté se směs aplikuje rovnoměrně po délce lamel s tloušťkou vrstvy cca 2 mm. Kompozit se směsí se nanáší na povrch a vyhlazuje se zadní částí ruky (v rukavici), a to od středu k okrajům. Následuje rovnoměrné přitlačení k povrchu betonového podkladu a vytlačení nadbytečného lepidla, které se provede za pomoci gumového válečku. Pohyb válečku musí probíhat ve směru podél vláken. Pohyb příčně vláknům není povolen. Mezi lamelu a betonový povrch musí být použity 2 mm plastové rozpěrky, aby se udržela minimální tloušťka lepidla. Nadbytečné lepidlo, které se vytlačí stranou, se odstraní ocelovou stěrkou.

Postupový diagram



Obr.25 – Postupový diagram,zdroj: autor. TP1- technologická přestávka, ZK - odtrhová zkouška, KK1,2,3 - kontrola kvality, VK1,2 - vizuální kontrola



Obr.26 – Zesílení ž.b. trámů pomocí CRFP lamel, Nemocnice Hořovice, zdroj: [33].

3.2.11 Jakost provedení

Vstupní kontrola

Před nalepením výztužných prvků se připravovaný podklad kontroluje podle požadavků. Kontrola připraveného základu by měla být provedena nejméně jeden den po dokončení opravy. Vzhled povrchu (absence nečistot, malých nepřesností) se posuzuje vizuálně, rovinnost s použitím dvoumetrové latě a přilnavost pomocí nedestruktivní zkoušky.

Mezioperační kontrola

Během přípravy adheziva se vizuálně sleduje homogenita pojivové hmoty po smíšení a nepřítomnost cizích sraženin.

Při nanesení lepidla na připravený základ jsou tloušťka a stejnoměrnost vrstvy vizuálně kontrolovány.

Při procesu lepení lamely se musí měřit teplota okolí. Perioda měření se určuje podle okolních faktorů, které mohou ovlivnit nebo změnit teplotu.

Výstupní kontrola

Po úplném vytvrzení polymerního kompozitu se provádí vizuální kontrola, aby se zjistila odloupenutí. Vnitřní vady (nepolepení plochy nebo



odloupnutí) se zaznamenávají také díky poklepání na povrch systému dřevěným kladívkem. Oprava závad se provádí vyříznutím poškozených zón a nalepením nových výztužných prvků. V tomto případě je nutné nastavit přípustnou vzdálenost překrytí výztužných prvků.

3.2.12 BOZ a PO

Při práci na stavbě musí být splněny základní podmínky bezpečnosti práce, se kterými musí být všichni dělníci na stavbě seznámeni. Stejně tak musí být seznámeni s technologickými postupy. Všechny tyto předpisy BOZP jsou dělníci povinni dodržovat. Při odstraňování povrchových vrstev betonu musí být dodrženy hygienické normy a normy pro bezpečnost práce. Tloušťka odstraněné vrstvy betonu vychází z projektu sanace. Při sanačních pracích na povrchu konstrukce nesmí dojít k podstatnému snížení statické únosnosti.

Konkrétní seznam právních předpisů

Zákon č. 309/2006 Sb., kterým se upravují další požadavky bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v pracovněprávních vztazích a o zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při činnosti nebo poskytování služeb mimo pracovněprávní vztahy (zákon o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci)

Nařízení vlády č. 591/2006 Sb. - o bližších minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví při práci na staveništích.

Příloha č. 2 : Bližší minimální požadavky na bezpečnost a ochranu zdraví při provozu a používání strojů a náradí na staveništi.

I. Obecné požadavky na obsluhu strojů.

XIV. Společná ustanovení o zabezpečení strojů při přerušení a ukončení práce.

Příloha č. 3 : Požadavky na organizaci práce a pracovní postupy.

XI. Montážní práce.

XIV. Lepení krytin na podlahy, stěny, stropy a jiné konstrukce.



XVII. Práce na údržbě a opravách staveb a jejich technického vybavení.

Konkrétní vymezení jednotlivých opatření pro zajištění BOZ a PO

Pro posouzení rizika úrazu během této technologie je třeba použít metodiku hodnocení rizik.

Odhad pravděpodobnosti, se kterou může uvažované nebezpečí opravdu nastat, se stanoví dle stupnice odhadu pravděpodobnosti vzestupně číslem od 1 do 5, kde je zjednodušeně zahrnuta míra, úroveň a kriteria jednotlivých nebezpečí. Míra rizika se poté počítá jakou součin následujících ukazatelů:

- Pravděpodobnost (P)
- Závažnost následků (Z)
- Názor hodnotitelů (N).

Pro posouzení a vyhodnocení zdrojů rizik je použito následující specifikace, která se zaznamenává do sloupců „P“, „Z“ a „N“:

Pravděpodobnost vzniku a existence rizika „P“:

1. nahodilá
2. nepravděpodobná
3. pravděpodobná
4. velmi pravděpodobná
5. trvalá

Pravděpodobnost následků – závažnost „Z“:

1. poranění bez pracovní neschopnosti
2. absenční úraz (s pracovní neschopností)
3. vážnější úraz vyžadující hospitalizaci
4. těžký úraz a úraz s trvalými následky
5. smrtelný úraz

Názor hodnotitelů „N“:



1. Zanedbatelný vliv na míru nebezpečí a ohrožení
2. Malý vliv na míru nebezpečí a ohrožení
3. Větší, zanedbatelný vliv na míru nebezpečí a ohrožení
4. Velký a významný vliv na míru nebezpečí a ohrožení
5. Více významných a nepříznivých vlivů na závažnost a následky ohrožení a nebezpečí.

Hodnotu rizika vypočítáme dle vzorce $R = P \times Z \times E$ [33].

Tab.8 – Metodika hodnocení rizik. Zdroj: [33].

<i>Významnost rizika</i>	<i>R(Míra rizika)</i>
<i>Bezvýznamné riziko</i>	0 - 3
<i>Akceptovatelné riziko</i>	4 - 10
<i>Mírné riziko</i>	11 - 50
<i>Nežádoucí riziko</i>	51 - 100
<i>Nepřijatelné riziko</i>	101 - 125

Výsledek analýzy je představen v příloze č.1. Z toho vyplývá, že riziko úrazu je na nízké úrovni, a může být odstraněno pomocí OOP.

3.2.13 Vliv na životní prostředí



Seznam odpadu

Tab.9 – Seznam odpadu. Zdroj: [34].

Katalogové číslo	Druh odpadu	Kategorie	Likvidace
080111	Komp. A a B	Odpadní barvy a laky obsahující organická rozpouštědla nebo jiné nebezpečné látky	Předat odborné firmě k likvidaci
080410	Vytvrzený materiál	Jiná odpadní lepidla a těsnicí materiály neuvedené pod číslem 08 04 09	Předat odborné firmě k likvidaci
170101	Beton	Beton, cihly, tašky a keramika	Skládka stavebního odpadu
170203	Plast	Dřevo, sklo a plasty	Skládka stavebního odpadu
200101	Papír	Složky z odděleného sběru (kromě odpadů uvedených v podskupině 15 01)	Skládka stavebního odpadu

Každý původce odpadů je povinen zařadit odpady podle druhů a kategorií, zabezpečit odpady před nežádoucím znehodnocením, odcizením nebo únikem, vést průběžnou evidenci o odpadech a způsobech nakládání s nimi, umožnit kontrolním orgánům přístup do objektů. Stejně tak se musí dodržovat zákaz pálení odpadů a stavebních zbytků. Likvidace nebezpečných odpadů zajišťují jen odborné firmy.



Možnosti poškození životního prostředí

Pokud budou dodrženy předepsané nebo doporučené požadavky na skladování materiálů a likvidaci odpadů, nemělo by dojít k únikům do půdy nebo atmosféry. Materiály jsou chemicky stabilní a neměly by vznikat žádné nebezpečné reakce.

3.3 Porovnání

3.3.1 Návrh alternativních technologií zesílení

Volba technologie výroby je určena účelem projektu, také i místními podmínkami, v nichž bude projekt realizován. Podstatné faktory pro technologii zesílení jsou faktory spojené s konstrukčními vlastnostmi budovy. Bez řádného odůvodnění nelze vybrat jednu nebo druhou technologii. V této práci je autor založil na faktech získaných po provedení alternativních prací na podobných objektech. Na tomto základě se předpokládá, že každá z navržených technologií je vhodná z hlediska statiky.

V této části budou navrženy dvě alternativy pro vyztužení pomocí lamel z uhlíkových vláken, které budou porovnány z hlediska technologie, cen a časově náročných nákladů.

Před porovnáním technologií navrhuje autor seznámit se s postupem práce, což může být alternativou.

Zesílení pomocí helikální výztuže

Při vyztužení trémového nosníku helikální výztuže je také nutné provést obnovu betonu, která byla popsána v předchozím odstavci. Prvním krokem je řezání drážek po celé délce trámu. Vyřízneme drážky speciální frézou.

Průměr nepřekročí 10–15 mm. Dalším krokem je čištění drážky ode všech druhů znečištění a následné vypláchnutí vodou. Kotevní malta se rozmíchá přímo v originálním kyblíku míchacím nástavcem nasazeným na vrtačku, dle návodu výrobce smícháním suché a tekuté složky v balení. Po 5 minutách se znovu promíchá a plní se do předem navlhčené aplikační pistole. Dále se připravené drážky naplní směsí. Podle rozměrů připravený prut vtlačíme tak, aby byl kompletně obklopen směsí ze zadní strany. Na prut pak



bude aplikována druhá vrstva směsi, která drážku zcela uzavře. Vyrovnání povrchu bude prováděno pomocí spárovací špachtle.

Zesílení torkretováním

Před vyztužením provádíme také čištění odpadajících dílů a armaturu natřeme antikoročním inhibitorem. Při této metodě nemá smysl nanášet vrstvu reprofilační malty, její funkce bude převzata betonem. Dále vyvrtáme v trámu otvory. Do otvorů osadíme ocelové trny ve vzdálenosti 350 mm a vyplníme je epoxidovou maltou. V předstihu připravujeme a svařujeme do tvaru trámů kari síť průměru 6 mm a se vzdáleností mezi oky 150 mm. Dále vložíme 2 betonářské pruty o průměru 14 mm a přivařujeme celou konstrukci k ocelovým trnům. Průměr profilu nebyl dimenzován, vycházel podle odhadu. Povrch musí být vyčištěn proudem stlačeného vzduchu. Pro spojení starého a nového betonu aplikujeme na připravený povrch adhezní vrstvu. Současně bude připravena stříkací směs. Na tomto objektu navrhuje autor použití mokrého způsobu, a to kvůli lepším lepicím vlastnostem a nízké prašnosti ve srovnání se suchým procesem. Použitím speciální pistole se beton aplikuje ze vzdálenosti 0,2 až 0,5 metru.

3.3.2 Ekonomické porovnání

Pro porovnání ekonomické části, sestavil autor rozpočet v programu EuroCalc.

Tab.10 – Rozpočet zesílených trámů pomocí UV. Zdroj: autor.

<i>Kód</i>	<i>Název materiálu/procesu</i>	<i>MJ</i>	<i>Množ.</i>	<i>Cena[Kč]</i>
413351213	Zřízení podpěrné konstrukce nosníků	m ²	32,68	11190
985112122	Odsekání degradovaného betonu tl. 30 mm	m ²	32,68	12234
949101111	Pomocné lešení do 1,9 m	m ²	32,68	1266
985132111	Očištění plochy tlakovou vodou	m ²	32,68	5316
985321111	Ochranný nátěr vyztuže 1 vrstva tl. 1 mm	m ²	32,68	7528
985323111	Spojovací můstek reprofilovaného betonu tl. 1 mm	m ²	32,68	11482
985311213	Reprofilace trámů sanačními maltami tl. 30 mm	m ²	32,68	73017



985132211	Očištění trámu sušeným křemičitým pískem	m ²	32,68	7617
985341121	Lepení uhlíkové lamely š. 50 mm	m ²	91,2	88072
985341123	Lepení uhlíkové lamely š. 100 mm	m ²	113,05	173971
				391693

Celková cena zesílení je 391 693 Kč.

Tab.11 – Rozpočet zesílený trámů pomocí HV. Zdroj: autor.

Kód	Název materiálu/procesu	MJ	Množ.	Cena[Kč]
413351213	Zřízení podpěrné konstrukce nosníků	m ²	32,68	11190
985112122	Odsekání degradovaného betonu tl. 30 mm	m ²	32,68	12234
949101111	Pomocné lešení 1,9 m	m ²	32,68	1266
985132111	Očištění plochy tlakovou vodou	m ²	32,68	5316
985321111	Ochranný nátěr výztuže 1 vrstva tl. 1 mm	m ²	32,68	7528
985323111	Spojovací můstek reprofilovaného betonu tl. 1 mm	m ²	32,68	11482
985311213	Reprofilace tramu sanačními maltami tl. 30 mm	m ²	32,68	73017
985441314	Přídavná šroubovitá nerezová výztuž D 10 mm	m	224,68	317662
				439695

Celková cena je 439 695 Kč.

Tab.12 – Rozpočet zesílený trámů pomocí torkretování. Zdroj: autor.

Kód	Název materiálu/procesu	MJ	Množství	Cena[Kč]
413351213	Zřízení podpěrné konstrukce nosníků	m ²	32,68	11190
985112122	Odsekání degradovaného betonu tl. 30 mm	m ²	32,68	12234
949101111	Pomocné lešení do 1,9 m	m ²	32,68	1266
985132111	Očištění plochy tlakovou vodou	m ²	32,68	5316
985321111	Ochranný nátěr výztuže 1 vrstva tl. 1 mm	m ²	32,68	7528



985323111	Spojovací můstek reprofilovaného betonu tl. 1 mm	m ²	32,68	11482
98564113	Kotvičky pro výztuž z oceli D 10 mm do cementové malty	kus	408	44167
985562322	Osazení výztuže stříkaného ze svařovaných sítí	m ²	152,78	37134
985561213	Osazení výztuže stříkaného betonu z betonářské oceli	t	0,355	14101
985521211	Nástřík betonu (mokrý směsí) tl. 30 mm	m ²	180,557	240927
				385345

Celková cena zesílení je 385 345 Kč.

Na základě vypočítaných dat jsou náklady při použití uhlíkových vláken a při torkretování na stejné cenové úrovni, rozdíl je asi 2%. Spirálová výztuž je nejdražší z předložených metod.

3.3.3 Porovnání časové náročnosti

Pomocí aplikace EuroCalc byla také vypočítána namáhavost každé metody a vytvořena srovnávací tabulka Nh. Intenzita práce se nebude převádět na směny a na dny, protože v průběhu restaurátorských prací není vždy možné přerušit činnost.

Tab.13 – Pracnost při zesílení trámů pomocí UV. Zdroj: autor.

Činnost	MJ	Množství	Jedn. prac.	Celková prac.[Nh].
<i>Zřízení podpěrné konstrukce nosníků</i>	m ²	32,68	0,3	9,804
<i>Odsekání degradovaného betonu tl. 30 mm</i>	m ²	32,68	0,915	29,9022
<i>Pomocné lešení do 1,9 m</i>	m ²	32,68	0,105	3,4314
<i>Očištění plochy tlakovou vodou</i>	m ²	32,68	0,335	10,9478
<i>Ochranný nátěr výztuže 1 vrstva tl 1 mm</i>	m ²	32,68	0,361	11,79748
<i>Spojovací můstek reprofilovaného betonu tl. 1 mm</i>	m ²	32,68	0,51	16,6668
<i>Reprofilace trámu sanačními maltami tl. 30 mm</i>	m ²	32,68	2,16	70,5888
<i>Očištění trámu sušeným křemičitým pískem</i>	m ²	32,68	0,28	9,1504



Lepení uhlíkové lamely š. 50 mm	m	91,2	0,85	77,52
Lepení uhlíkové lamely š. 100 mm	m	113,05	0,942	106,4931
				346,30198

Tab.14 – Pracnost při zesílení trámů pomocí HV. Zdroj: autor.

Činnost	MJ	Množství	Jedn. prac.	Celková prac.[Nh].
Zřízení podpěrné konstrukce nosníků	m ²	32,68	0,3	9,804
Odsekání degradovaného betonu tl. 30 mm	m ²	32,68	0,915	29,9022
Pomocné lešení do 1,9 m	m ²	32,68	0,105	3,4314
Očištění plochy tlakovou vodou	m ²	32,68	0,335	10,9478
Ochranný nátěr výztuže 1 vrstva tl. 1 mm	m ²	32,68	0,361	11,79748
Spojovací můstek reprofilovaného betonu tl. 1 mm	m ²	32,68	0,51	16,6668
Reprofilace trámu sanačními maltami tl. 30 mm	m ²	32,68	2,16	70,5888
Frézování drážek D. 10 mm	m	224,68	0,67	150,5356
Přídavná šroubovitá nerezová výztuž D 10 mm	m	224,68	1,89	303,67408
				607,34816

Tab.15 – Pracnost při zesílení trámů pomocí torkretování. Zdroj: autor.

Činnost	MJ	Množství	Jedn. prac..	Celková prac.[Nh].
Zřízení podpěrné konstrukce nosníků	m ²	32,68	0,3	9,804
Odsekání degradovaného betonu tl. 30 mm	m ²	32,68	0,915	29,9022
Pomocné lešení do 1,9 m	m ²	32,68	0,105	3,4314
Očištění plochy tlakovou vodou	m ²	32,68	0,335	10,9478
Ochranný nátěr výztuže 1 vrstva tl. 1 mm	m ²	32,68	0,361	11,79748
Spojovací můstek reprofilovaného betonu tl. 1 mm	m ²	32,68	0,51	16,6668
Kotvičky pro výztuž z oceli D 10 mm do cementové malty	kus	408	0,34	138,72



Osazení výztuže stříkaného ze svařovaných sítí	m ²	152,78	0,6	91,668
Osazení výztuže stříkaného betonu z betonářské oceli	t	0,355	42,68	15,1514
Nástřík betonu (mokrý směsí) tl. 30 mm	m ²	180,557	1,943	350,82225
				678,91133

Na základě vypočítaných údajů je vyztužení pomocí uhlíkových vláken mnohem méně namáhavé ve srovnání s jinými metodami. Výztuha může být provedena o 49 % rychleji než výztuha postříkem a o 43 % rychleji než u spirálové výztuže.

3.3.4 Rizika spojená s technologiemi

Rizika během rekonstrukčních prací navrhuje autor rozdělit do 3 částí. Rizika související s konstrukcí (chybné rozhodnutí při zavádění technologie a vady materiálů), rizika spojená se zraněními a rizik spojených s požární bezpečností.

Pokud jde o zpevnění pomocí kompozitů, je třeba vzít v úvahu skutečnost, že tato oblast je spíše mladá a málo studovaná ve srovnání s konvenčními. Podle názoru autora budou rizika spojená s výstavbou největší problematikou u této technologii. Zaprvé při požáru vzniká v lepidle proces zeskenění, který vede k oddělení lepicí vrstvy a v důsledku toho ke ztrátě zesílení. Rovněž zásah do soudržnosti se strukturou může poškodit její mechanické vlastnosti. Například pokud se jí někdo velkou silou dotkne. Navíc nedostatek zkušeností s tímto materiálem snižuje možnosti využití zkušeností s řešením určitých problémů. Úrazy různé závažnosti nejsou pravděpodobné [viz rizika a opatření].

Samotná technologie zesílování pomocí helikální výztuže také vyžaduje provedení s velkou ohleduplností, omezujíc chyby, jinak nebude mít výsledek požadovaný vliv. Rizikem také v tomto případě budou zranění při výrobě. Jakákoliv činnost s ocelí vyžaduje zvýšenou pozornost, s ohledem na její hmotnost a náročnost při manipulaci.

Pokud mluvíme o torkretování, měla by být při práci věnována velká pozornost bezpečnosti. Kromě práce s výztuží by měla být věnována velká



pozornost i prachu. Maximální prašnost na pracovišti nesmí překračovat maximální povolenou koncentraci prachových částic. Navíc použití velkého počtu mechanizace výrazně zvyšuje riziko zranění.

Rizika uvedená výše jsou zhrnuta v tabulce podle závažnosti následků. Za tímto účelem byla použita metoda klasifikování do tříd. Nejnebezpečnějším rizikem bude číslo 3 a méně nebezpečné - číslo 1. Hlavním nebezpečím při této práci budou rizika spojená s kolapsem konstrukce, neboť následky mohou vést ke zhroucení budovy, kde je ohrožena nejen ekonomická součást projektu, ale i životy lidí. V souladu s tím autor přiřadí číslo 3 k riziku spojenému s výskytem požáru, který nelze nikdy vyloučit, je možné pouze zabezpečit pracovní prostředí proti jeho výskytu. Číslo 2 je přiřazeno rizikům spojeným s konstrukčními vadami a chybami, které mohou být zjištěny včasnou kontrolou a opraveny bez zbytečného odkladu, čímž je možno předejit nahlý kolaps celé konstrukce. Číslo 1 je přiřazeno riziku spojenému se zraněními, které lze minimalizovat ochrannými pomůckami a bezpečnostními pokyny.

Pro přesnější posouzení možnosti úrazu, byla zpracována analýza rizik, která se nachází v příloze č. 1.

Tab.16 –Rizika . Zdroj: autor.

<i>Riziko</i>	<i>Váha</i>	<i>UV</i>	<i>Hel. vyz.</i>	<i>Torkret.</i>
<i>Požár</i>	3	+	-	-
<i>Chyby</i>	2	+	+	-
<i>Úraz</i>	1	-	+	+
<i>Výsledek</i>		5	3	1

3.3.5 Stručný přehled kritérií a variant



Tab.17 – Stručný přehled kritérií a variant . Zdroj: autor.

Kritéria	UV	HV	Torkretování
Náklady	391693 [Kč]	439695 [Kč]	385345 [Kč]
Pracnost	346,3 [Nh]	607,4 [Nh]	678,9 [Nh]
Rizika	5	3	1
Redukce užité výšky	Minimální	Žádná	Viditelná
Komplikovanost provádění	Lehce	Středně	Těžké

Ve výše uvedené tabulce jsou shromážděna kritéria pro porovnávání těchto technologií. Srovnatelně nejhorší charakteristiky mají nejtmaší odstín, nejlepší mají naopak nejsvětější odstín. Při posuzování prvních dvou kritérií byly použity informace z rozpočtů a pracnosti provedené pomocí programu EuroCalc. Ostatní kritéria byla hodnocena z pohledu autora na základě literatury uvedené na začátku praktické části.

3.3.6 Vyhodnocení

Chceme-li vyhodnotit a zvolit nejlepší varianty zesílení, je třeba vyhodnotit každé kritérium z hlediska jeho významu. Za tímto účelem byla zvolena Saatyho metoda, v níž bylo nejprve každé kritérium zváženo a poté bude vyhodnocena nejlepší technologie.

Popis Saatyho metody

Většina metod komplexního hodnocení vyžaduje nejprve stanovit váhy jednotlivých kritérií hodnocení, které vyjadřují důležitost kritérií z hlediska hodnotitele. Čím je kritérium významnější, tím je jeho váha větší. Pro dosažení srovnatelnosti vah souboru kritérií stanovených různými metodami se tyto váhy zpravidla normují tak, aby jejich součet byl roven jedné.

Saatyho metodu stanovení vah kritérií lze rozdělit do dvou kroků. První krok zjišťuje preferenční vztahy dvojic kritérií uspořádaných v tabulce, v jejichž



řádcích i sloupcích jsou zapsána kritéria ve stejném pořadí. Kromě směru preference dvojic kritérií určuje také velikost této preference, která se vyjadřuje určitým počtem bodů ze zvolené bodové stupnice (pro vyjádření velikostí preferencí bodové stupnice opatřené deskriptory uvedené v tabulce).

Tab.18 – vyjádření velikostí preferencí bodové stupnice opatřené deskriptory. Zdroj:

[35].

Počet bodů	Deskriptor
1	kritéria jsou stejně významná
3	první kritérium je slabě významnější než druhé
5	první kritérium je dosti významnější než druhé
7	první kritérium je prokazatelně významnější než druhé
9	první kritérium je absolutně významnější než druhé

K přesnějšímu rozlišení velikosti preferencí je možné volit hodnoty 2, 4, 6, 8. Zvolená kritéria pro vyhodnocení nevhodnější varianty jsou uvedena v tabulce č.19.

Tab.19 – Zvolená kritéria pro vyhodnocení nevhodnější varianty. Zdroj: autor.

Názvy kritérií

K1	Náklady
K2	Pracnost
K3	Rizika
K4	Redukce užitné výšky
K5	Komplikovanost provádění

Významnost kritérií hodnocená Saatyho metodou

Autor stanovuje postupně velikosti preferencí jednotlivých dvojic kritérií uspořádaných v tabulce, kde jsou v řádcích a sloupcích zapsána kritéria v témže pořadí, přičemž velikost preference vyjadřuje vždy přiřazením určitého počtu bodů z bodové stupnice opatřené deskriptory, uvedenými v tabulce č.18.



Pokud je kritérium uvedené v řádku významnější než kritérium uvedené ve sloupci, zapíše se do příslušného políčka počet bodů, kterými hodnotitel vyjadřuje velikost preference kritéria v řádku vzhledem ke kritériu ve sloupci. Pokud je naopak kritérium ve sloupci významnější než kritérium v řádku, zapíše se do příslušného políčka převrácená hodnota zvoleného počtu bodů.

Mezi nejdůležitější kritéria řadí autor náklady a pracnost, přičemž pracnost považuje za poněkud důležitější kritérium v souvislosti s tím, že jde o nemocniční projekt. Pomocí důležitosti stanovíme Saatyho matici, kdy se na diagonále nachází hodnota 1. Vyhodnotíme nejprve prvky nad diagonálou a poté získáme prvky pod diagonálou jako převrácené hodnoty.

Tab.20 – Saatyho metoda. Zdroj: autor.

Saatyho metoda						
<i>Kij</i>	k1	k2	k3	k4	k5	
<i>k1</i>	1	3	1/5	1/7	1/7	
<i>k2</i>	1/3	1	1/5	1/7	1/7	
<i>k3</i>	5	5	1	1/5	1/5	
<i>k4</i>	7	7	5	1	3	
<i>k5</i>	7	7	5	1/3	1	
<i>Ai</i>	81,667	735,000	1,000	0,001	0,012	Součet
<i>Ri</i>	2,412	3,743	1,000	0,267	0,415	7,837
<i>Vi</i>	0,308	0,478	0,128	0,034	0,053	

Nejprve vyplníme Saatyho matici:

1. Na diagonále budou jedničky ($s_{ii} = 1$).
2. $s_{ij} \in \langle 0, 9 \rangle$, pokud i je preferováno před j .
3. $s_{ji} = 1/s_{ij}$
4. Pro každé i spočítáme hodnotu $A_i = \sum_{j=1}^k A_{ij}$.
5. Pro každé i spočítáme hodnotu $R_i = A_i^{1/k}$
6. Dále spočítáme $\sum_{i=1}^k R_i$.
7. Nakonec určíme váhy kritérií podle vztahu $V_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^k R_i}$.



V následující tabulce jsou kritéria seřazena podle zvolených preferencí a výsledků ze Saatyho matice.

Tab.21 – Kritéria seřazena podle zvolených preferencí. Zdroj: autor.

	Názvy kritérií	V_i
k_2	Pracnost	0,478
k_1	Náklady	0,308
k_3	Rizika	0,128
k_5	Komplikovanost provádění	0,053
k_4	Redukce výšky	0,034

Celkové vyhodnocení

Pro celkové hodnocení technologie byla použita kritéria z tabulky č. ohodnocena 1–3. Poměrně lepším kritériem je stupeň 3, střední 2 a nejhorší 1. Údaje se vynásobí hmotností a na základě toho je vybrána nejvhodnější varianta.



.22 – Celkové hodnocení technologie. Zdroj: autor.

UV	Body	Vi	Vi*Body
Náklady	2	0,308	0,616
Pracnost	3	0,478	1,434
Rizika	1	0,128	0,128
Redukce užité výšky	2	0,034	0,068
Komplikovanost provádění	3	0,053	0,159
		Součet	2,405
HV	Body	Vi	Vi*Body
Náklady	1	0,308	0,308
Pracnost	2	0,478	0,956
Rizika	2	0,128	0,256
Redukce užité výšky	3	0,034	0,102
Komplikovanost provádění	2	0,053	0,106
		Součet	1,728
Torkret.	Body	Vi	Vi*Body
Náklady	3	0,308	0,924
Pracnost	1	0,478	0,478
Rizika	3	0,128	0,384
Redukce užité výšky	1	0,034	0,034
Komplikovanost provádění	1	0,053	0,053
		Součet	1,873

Pokud dáváme pracnost na první místo a náklady na druhé, pak na základě Saatyho metody vyplývá, že vhodným řešením je použití lamely s uhlíkovými vlákny, a následnou metodou torkretování. Nevhodnou metodou je použití výztuže helikální.



ZÁVĚR

Cílem dané práce je výzkum oblasti použití kompozitních materiálů na základě uhlíkového vlákna pro účely stavebnictví. V teoretické části autor popisoval oblasti použití daného materiálu, jeho výhody pro účely stavebnictví a nevýhody s kterými se setkáváme při jeho použití. Důležité je také porovnání v teoretické části kompozitních materiálů s materiály tradičními, např. s oceli. V praktické části byl sestaven technologický postup pro zesílení nosných trámů pomocí materiálů na základě uhlíkového vlákna a následné porovnání této technologií s alternativními způsoby; zesílení pomocí helikální výztuže a torkretování.

Hypotéza dané práce spočívá v možnosti náhrady tradičních stavebních materiálů za materiály na základě uhlíkového vlákna. Z celého výzkumu v teoretické části vyplývá:

- 1) Široké využití UV ve stavebnictví dokáže snížit uvolnění CO₂ do atmosféry.
- 2) Použití daného materiálu značně urychluje a zjednodušuje stavební proces, zejména při pracích na dodatečném zesílení.
- 3) Jeho mechanické vlastnosti dovolují vyrábět konstrukce s tenším řezem a s formou nedostupnou pro klasické stavební materiály.
- 4) Kvůli delší životnosti a menší potřeby v opravách v porovnání s většinou tradičních materiálů je použití UV v dlouhodobém výhledu výhodnější i z finančního hlediska.
- 5) Výroba kompozitních materiálů je komplikovanější než výroba metalu.
- 6) Kompozitní material se odlišuje vysokou cenou v porovnání s analogy.
- 7) Relativní menší zručnost s použitím UV ve stavebnictví snižuje možnost využití stavebních dovedností v souvislosti s tímto materiálem.



8) Z předchozího bodu vyplývá že pro aplikování daného kompozitu ve stavebnictví není dostatek kvalifikovaných projektantů a pracovníků.

Následuje i to že materiály na základě UV mohou být náhradou za tradiční stavební materiály pouze v případě že bude prokázána jejich účelnost z finančního hlediska, spočítána možnost jejich použití z hlediska statiky a garantována bezchybná aplikace.

Jako důkaz, v praktické části byly porovnány účelnosti zesílení pomocí UV a pomocí tradičních metod. Hlavními kritérii jsou pracnost, náklady, rizika, komplikovanost provedení a redukce užitné výšky. Na základě Saatyho metody pro každý kritérium byly udělovány hodnoty v závislosti na závažnosti. Za výsledek se prokázalo že použití materiálů na základě UV je výhodnější.

Je třeba si uvědomit, že zavedení použití novější technologií neznamená okamžitý zánik technologií starších. UV a materiály odvozené od UV jsou výhledovým směrem ve stavebnictví. Uhlíkové vlákno má totiž veškeré vlastnosti pro náhradu za tradiční materiály ve většině stavebních oblastí. Ale pro to aby nastala náhrada je nutno nejprve vyřešit mnoho problémů popsaných výše. Je třeba vynalézt levnější a méně komplikovanější metody výroby, provádět více výzkumů a průzkumu technologických řešení s tímto materiálem spojených. Velkou roli hraje také popularizace, která umožní se o UV potenciálním spotřebitelům dozvědět a přispěje k rozvoji této technologií.



SEZNÁM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 8086960293;9788086960296;.
- [2] Úvod do problematiky kompozitních materiálů. Ortotikaprotetika.cz [online]. VUT - FSI Brno: Ing. Jiří ROSICKÝ, CSc., Doc. Ing. Josef KLEMENT, CSc., 2012 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc4a791405f74c.htm>
- [3] BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1988.
- [4] LEGENDRE, André. Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-86073-82-3.
- [5] REJL, Oldřich, Kompozitní materiály ve stavebnictví [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [6] BOOKER, Richard a Earl BOYSEN. Nanotechnology for dummies. Hoboken, N.J: Wiley, 2005. ISBN 9780764583681;0764583689;.
- [7] Kompozity na bázi uhlíku a jejich vodivos, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing.Barbora Šafaříková.
- [8] Fiber manufacturing [online], In: . [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/umairbukhari3/fiber-manufacturing>
- [9] KOMPOZITNÍ MATERIÁLY [online], In: . [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [10] JANČÁŘ, Josef a Vysoké učení technické v Brně. Chemická fakulta. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2003. ISBN 8021424435;9788021424432;.
- [11] Carbon Fiber Composite Design Guide [online], In: . [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.performancecomposites.com/images/Design-with->



carbon-fiber.pdf

[12] MORGAN, Peter, 2005. Carbon fibers and their composites. CRC Press Taylor & Francis Group.

[13] OVCHINNIKOV, I., Š. VALIEV, I. OVCHINNIKOV, V. ZINOVEV a A. USMIROV, 2016. Voprosy usilenija zelezobetonnych konstrukcii [online]. In: . [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://elima.ru/articles/index.php?id=148>

[14] Carbo systém [online], In: . [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.sanax.cz/technicke-informace/carbo-system>

[15] SEMENOVA, D.M., *STRENGTHENING CONCRETE STRUCTURES WITH CARBON FIBER* [online]. In: . Nizhny Novgorod State University Architecture and Civil Engineering [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://www.scienceforum.ru/2016/pdf/18406.pdf>

[16] BADJIN, Genadij a Sergey SYCHEV, 2013. *SOVREMENNYE TECHNOLOGII STROITELSTVA I REKONSTRUKCII ZDANIJ*. Nizniy Novgorod: BHV-PETERBURG. ISBN 978-5-9775-0856-8.

[17] KENNEDY, Gaylene Denise. Repair of cracked steel elements using composite fibre patching: ProQuest Dissertations Publishing, 1998. ISBN 0612343847;9780612343849;.

[18] STARCEV, S.A. a A.A. SUNDUKOVA, Usilenije kirpicnoi kladky kompozitnymi materialami i vintovymi sterznymi. *Construction of unique buildings and structures* [online]. **2014** [cit. 2018-04-21]. ISSN ISSN 2304-6295. Dostupné z: http://unistroy.spbstu.ru/index_2014_21/2_sundukova_21.pdf

[19] GIRGLE, F. Analýza kotevní oblasti prvků předpjatých FRP výztuží. In *JUNIORSTAV 2011 - Sborník anotací*. Purkyňova 95a; Brno 612 00: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2011. s. 121-121. ISBN: 978-80-214-4232- 0.

[20] HOLLAWAY, L. a J. G. TENG. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Cambridge: Woodhead, 2008. ISBN 978-1-84569-448-7.



- [21] LAVRIENTIEVA, Violetta, 2017. *Rekonstrukcie mostov s izpolzovaniem kompozitnich materialov* [online]. In: . [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://moluch.ru/archive/154/43532/>
- [22] AVCHERENKO, Gleb a Aleksandr KVIKTO, *RAZVITIE KOMPOZITOV V MOSTOSTROJENII* [online]. In: . [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://interactive-plus.ru/e-articles/281/Action281-114251.pdf>
- [23] The international handbook of FRP composites in civil engineering. Beaverton: Ringgold Inc, 2014.
- [24] LIU, Yue, Bernd ZWINGMANN a Mike SCHLAICH, 2015. *Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures*[online]. In: . Alper Ilki and Masoud Motavalli [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2073-4360/7/10/1501/htm>
- [25] SCHEERER, Silke, Rostislav CHUDOBA, Maria PATRICIA a Manfred CURBACH, SHELLS MADE OF TEXTILE REINFORCED CONCRETE. *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES* [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3490168/mod_resource/content/1/Jia ss 2017 vol58 no1 12 Scheerer Textile-reinforced-concrete-Germany.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3490168/mod_resource/content/1/Jia%20ss%202017%20vol58%20no1%2012%20Scheerer%20Textile-reinforced-concrete-Germany.pdf)
- [26] REDMOND, Kendra, 2016. Study quantifies impact of CO2 sequestration via cement carbonation. In: *Nature Geoscience* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/news/study-quantifies-impact-of-co2-sequestration-via-cement-carbonation>
- [27] GAO, Yijian, 2013. *Advanced FRP for Flooring in Buildings: A Low carbon material application in the construction industry* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: [https://researchportal.port.ac.uk/portal/files/5922590/Final thesis 14 06 2013.pdf](https://researchportal.port.ac.uk/portal/files/5922590/Final%20thesis%2014%2006%202013.pdf). Disertační práce. The University of Portsmouth.
- [28] LIEW, K. M., Z. X. LEI a L. W. ZHANG. Mechanical analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composites: A review. *Composite Structures*. 2015, vol. 120, s. 90-97. ISSN 0263-8223.



- [29] BHARATHIDASAN, S. a T.K. KRUSHNADESIKAN, 2015. Carbon Fibre Reinforced Gypsum Buildings. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://ijiset.com/vol2/v2s2/IJISSET_V2_I2_33.pdf
- [30] CARBONCAST ENCLOSURE SYSTEMS [online], [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <https://altusprecast.com/>
- [31] Features of the carbon fiber strand rod [online], [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>
- [32] Odtrhoměr [online], In: . [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.proinex.cz/cs/>
- [33] Metodika hodnocení rizik [online], In: . [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://grentzvacek.cz/wp-content/uploads/2013/01/Registr-rizik-a-opatreni-Zvacek.pdf>
- [34] Katalog odpadů [online], [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.katalogodpadu.cz/> - top
- [35] Metody stanovení vah kriterií [online], [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/mhd/kvalita-vahy.htm>
- [36] LIPTÁK, T. a V. MALINOVSKÝ. *Rekonštrukcia a modernizácia stavieb*. Košice: Edičné stredisko Vysokej školy technickej, 1990.
- [37] VANĚK, Tomáš. *Rekonstrukce staveb*. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1985.



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Posouzení stávající konstrukce, návrh zesílení trámů a schéma konstrukce

Příloha č. 2 – Analýza a řízení rizik BOZP



SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- UV - Uhlíkové vlákno
- PAN - Polyakrylnitrilová vlákna
- PVC - Polyvinylchlorid
- GFRP - Plast zesílený skelnými vlákny
- CFRP - Uhlíkovými vlákny tvrzené plasty
- AFRP - Aramidovými vlákny tvrzené plasty
- FRP - Vlákny vyztužený polymer
- CTE - Teplotní součinitel roztažnosti
- TRC - Textilní beton je kompozit sestávající z cementové matrice vyztužené plošnou anorganickou textilií.
- TZB - Technické zařízení budov
- CFRG - Sádra vyztužená uhlíkovým vláknem
- HV - Helikální výztuž
- OOP - Osobní ochranné prostředky



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1 - Trendy a prognózy přepravy uhlíkových vláken [6].....	11
Obr.2 - Výroba vláken [8].....	14
Obr.3 – uhlíkový tkaninový materiál [14].....	20
Obr.4 – uhlíkovo-vláknité CFRP lamely [14].....	21
Obr.5 – uhlíkovo-vláknité tyče [14].....	21
Obr.6 –vyztužení prostého nosníku [14].....	22
Obr.7 –vyztužení sloupu [14].....	23
Obr.8 –vyztužení otvoru [14].....	23
Obr.9 – vyztužení zděných konstrukcí [18].	25
Obr.10 – vyztužení dřevěného trámu [18].	27
Obr.11 – Zesilování mostu pomocí kompozitních materiálů [21].....	29
Obr.12 – Tsukuba FRP most, (a) foto (fotografie: Iwao Sasaki) a (b) skica [24].....	31
Obr.13 – Stork Bridge, (a) foto a (b) skica [24].....	31
Obr.14 – TRC konstrukce ze šesti odlitých součástí [25].	32
Obr.15 – distTEX: speciální rozpěrky pro textilní mřížky [25].	33
Obr.16 –zesilování střechy [25].	35
Obr.17 – CFRP panel a pohled v příčném řezu [27].	36
Obr.18 –Spojení [27].....	36
Obr.19 – Systémy podlahových panelů CFRP [27].....	36
Obr.20 – Průřez panelu CFRG [29].....	38
Obr.21 – Výztužná síť stěnového panelu z uhlíkových vláken [30].....	40
Obr.22 – Budova Komatsu Seiren v Japonsku s tyče z uhlíkových vláken jako seizmická výztuž [31].....	41
Obr.23 – Nemocnice Hořovice., zdroj: internet.....	42
Obr.24 – Odtrhoměr COMTEST®OP3 [32].....	47



Obr.25 – Postupový diagram,zdroj: autor.....	50
Obr.26 – Zesílení ž.b. trámů pomocí CRFP lamel, Nemocnice Hořovice [33].....	51



SEZNAM TABULEK

Tab.1. Srovnávací charakteristiky kompozitních vláken [20].....	16
Tab.2 - Srovnávací charakteristiky FRP a ocelí [19].....	16
Tab.3 – Porovnání CFRG a tradiční metody vystavby [29].....	38
Tab.4 –Množství materiálů pro rekonstrukce podkladu. zdroj: autor.....	43
Tab.5 – Vlastnosti CFRP lamely [14].	44
Tab.6 – Vlastnosti ledipla CarboResin [14].....	44
Tab.7 – Množství materiálů pro zesílení pomocí CFRP lamel. Zdroj: autor.....	44
Tab.8 – Metodika hodnocení rizik [33].....	54
Tab.9 – Seznam odpadu [34].....	55
Tab.10 – Rozpočet zesílený trámů pomocí UV. zdroj: autor.....	57
Tab.11 – Rozpočet zesílený trámů pomocí HV. zdroj: autor.....	58
Tab.12 – Rozpočet zesílený trámů pomocí torkretování. zdroj: autor.	58
Tab.13 – Pracnost při zesílený trámů pomocí UV. zdroj: autor.	59
Tab.14 – Pracnost při zesílený trámů pomocí HV. zdroj: autor.	60



Tab.15 – Pracnost při zesílení trámů pomocí torkretování. zdroj: autor.....	60
Tab.16 – Rizika . Zdroj: autor.....	62
Tab.17 – Stručný přehled kritérií a variant . Zdroj: autor.....	63
Tab.18 – Vyjádření velikostí preferencí bodové stupnice opatřené deskriptory [35].....	64
Tab.19 – Zvolená kritéria pro vyhodnocení nejvhodnější varianty. zdroj: autor.....	64
Tab.20 – Saatyho metoda. zdroj: autor.....	65
Tab.21 – Kritéria seřazena podle zvolených preferencí. zdroj: autor.	66
Tab.22 – Celkové hodnocení technologie. zdroj: autor.	67