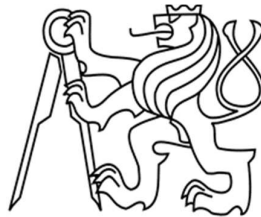


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Integrální bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA ŽELEZOBETONOVÝCH
PRVKŮ ZESÍLENÝCH KOMPOZITNÍMI LAMELAMI
VYSTAVENÝCH VYSOKÝM TEPLOTÁM**

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL
MEMBERS STRENGTHENED BY COMPOSITE PLATES EXPOSED TO
HIGH TEMPERATURES

Bc. Pavel Hejduk

vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.

2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejduk** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **477183**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra betonových a zděných konstrukcí**
Studijní program: **Integrální bezpečnost staveb**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Experimentální analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami vystavených vysokým teplotám

Název diplomové práce anglicky:

Experimental analysis of reinforced concrete structural members strengthened by composite plates exposed to high temperatures

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury.
Návrh experimentu – vzorky, vyztužení, způsob zatěžování a měření atd.
Provedení experimentu.
Vyhodnocení experimentu.
Závěr.

Seznam doporučené literatury:

fib Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. 2001
fib Bulletin 40. FRP reinforcement in RC structures. 2007
ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2 (včetně nové generace).
ACI PRC-440.2-17. ACI PRC-440.2-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Radek Štefan, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSv

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **05.10.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Radek Štefan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Experimentální analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami vystavených vysokým teplotám vypracoval samostatně s využitím citované literatury pod odborným vedením Ing. Radka Štefana, Ph.D., FEng. a konzultanta Ing. Romana Chylíka.

V Praze dne

.....

Bc. Pavel Hejduk

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., FEng., za odborné vedení, cenné rady a připomínky a ochotu při konzultacích, které mi pomohly při zpracování této diplomové práce. Nedílné poděkování patří i mým konzultantům, kteří vždy s ochotou diskutovali se mnou o dané problematice a snažili se mě nasměrovat správným směrem pro splnění stanovených cílů.

Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině, která mě podporovala, pomáhala mi a poskytla mi zázemí po celou dobu mého studia.

Obsah

Obsah	5
Abstrakt	8
Abstract	9
1 Úvod	11
1.1 Motivace	11
1.2 Cíle práce.....	11
2 Využití lamel	12
3 Způsob uložení lamel	13
3.1 Obecný postup aplikace	14
4 Vlákná lamel	14
4.1 Uhlíková vlákna (CF).....	14
4.2 Skleněná vlákna (GF).....	16
4.3 Aramidová vlákna (AF)	16
4.4 Přírodní vlákna	17
5 Pryskyřice	18
6 Způsoby ochrany před zvýšenými teplotami	18
6.1 Podhled.....	19
6.2 Obklad	19
6.3 Nátěry, nástřiky a omítky	19
7 Současně provedené experimenty	20
7.1 Zkoušky požární odolnosti železobetonových nosníků zesílených CFRP s různými způsoby ochrany [23]	20
7.1.1 Popis experimentu.....	20
7.1.2 Průběh a výsledek experimentu.....	22
7.1.3 Závěr experimentu	23
7.2 Experimentální chování železobetonových nosníků vyztužených FRP vystavených návrhovému požáru [24]	24
7.2.1 Popis experimentu.....	24
7.2.2 Průběh experimentu	25
7.2.3 Závěr experimentu	26
7.3 Požární chování železobetonových nosníků zesílených CFRP v plném rozsahu chráněných různými izolačními systémy [25]	26
7.3.1 Popis experimentu.....	26
7.3.2 Tepelná odezva	27
7.3.3 Závěr experimentu	28

7.4	Požární chování tepelně izolovaných železobetonových nosníků vyztužených EBR-CFRP pásy: Experimentální studie [26].....	29
7.4.1	Popis experimentu.....	29
7.4.2	Teploty	30
7.4.3	Výsledek.....	31
7.4.4	Závěr experimentu	32
7.5	Požární chování železobetonových desek vyztužených CFRP pomocí různých technik – EBR, NSM a CREAtE [27].....	33
7.5.1	Popis experimentu.....	33
7.5.2	Výsledky zkoušek.....	36
7.5.3	Závěr experimentu	39
7.6	Příklady dalších experimentů	40
8	Praktická část.....	41
9	Příprava na zkoušku požární odolnosti.....	41
9.1	Nosníky	41
9.2	Bednění.....	42
9.3	Výztuž.....	43
9.4	Betonová směs.....	44
9.5	Lamely.....	46
9.6	Lepidlo	47
9.7	Zahřívací zařízení	47
9.8	Způsob měření teplot: Termočlánky.....	48
9.8.1	Umístění termočlánku.....	49
9.9	Hydraulický lis	51
10	Výroba zkušebních prvků	51
10.1	Výroba nosníků	51
10.2	Dodatečné zesílení nosníku.....	54
10.2.1	Lepidlo	54
10.2.2	Uhlíková lamela.....	54
10.2.3	Postup lepení uhlíkové lamely na nosník.....	54
11	Laboratorní zkoušky pro zjištění mechanických vlastností betonu.....	55
11.1	Pevnost betonu v tlaku.....	56
12	Experimentální analýza	56
12.1	Příprava prostoru zkoušky.....	56
12.2	Průběh zatěžování.....	59
12.3	Průběh zahřívání	60
12.3.1	Průběh zahřívání nosníku T7.....	60

12.3.2	Průběh zahřívání nosníku T8.....	62
12.3.3	Průběh zahřívání nosníku T9.....	64
13	Vyhodnocení a porovnání výsledků	65
13.1	Vyhodnocení výsledků nosníku (T7).....	65
13.2	Vyhodnocení výsledků nosníku (T8).....	69
13.3	Vyhodnocení výsledků nosníku (T9).....	73
13.4	Porovnání výsledků	76
14	Vyhodnocení experimentální analýzy	77
15	Závěr	78
	Seznam obrázků.....	79
	Seznam tabulek.....	82
	Seznam grafů.....	83
	Literatura	84

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na význam lamel z uhlíkových vláken (CFRP) v systémech pro zesilování betonových konstrukcí. Diskutovány jsou vlastnosti těchto lamel a lamely jsou rozděleny podle druhů vláken. Vypsány jsou druhy pryskyřic pro lepení lamel. Dále jsou prezentovány různé metody aplikace lamel pro zesílení konstrukcí a jejich výhody. Diplomová práce také pojednává o metodách ochrany lamel před požárem, jako je použití požárního obkladu a alternativních přístupů, jako jsou tepelně izolační vrstvy. Popsány jsou studie s výsledky experimentů ukazující, že správně navržené a aplikované systémy ochrany dokážou výrazně zlepšit požární odolnost konstrukcí. Celkově lze konstatovat, že lamely z uhlíkových vláken představují moderní a účinnou technologii pro posílení a zvýšení odolnosti betonových konstrukcí. V praktické části je popsána příprava, průběh a výsledky provedené malorozměrové zkoušky požární odolnosti nosníku zesílených lamelami.

Klíčová slova

Lamela; požární odolnost; úspora materiálu; zesilování stavebních konstrukcí; vyztužení nosníku; beton; uhlíková lamela; pryskyřice.

Abstract

This thesis focuses on the importance of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) plates in concrete reinforcement systems. The properties of these plates are discussed and the plates are classified according to the types of fibers. The types of resins for bonding the plates are listed. In addition, different methods of applying slats for strengthening structures and their advantages are presented. The thesis also discusses methods of protecting plates against fire, such as fire protection cladding and alternative approaches such as thermal insulation layers. Studies are described with experimental results showing that properly designed and applied protection systems can significantly improve the fire resistance of structures. Overall, it can be concluded that carbon fiber plates represent a modern and effective technology for strengthening and increasing the resistance of concrete structures. In the practical part, the preparation, the course, and the results of the small-scale fire resistance test carried out on beams reinforced with plates are described.

Keywords

Plates; fire resistance; material savings; reinforcement of building structures; beam reinforcement; concrete; carbon slat; resin.

Seznam použitých zkratk

Zkratky

PO	Požární odolnost
CFRP	Lamel z uhlíkových vláken
CF	Carbon fiber
FRP	Uhlíková vlákna
EBR	Externě vázaná vyztuž
NSM	Pásy namontované na blízkém povrchu
CREatE	Souvislá vyztuž zabudovaná na koncích
Tg	Teplota skelného přechodu

1 Úvod

1.1 Motivace

Dnešní uhlíkové lamely bez dodatečné požární ochrany se považují při vzniku požáru s nulovou požární odolností. Tato práce je součástí výzkumného projektu, v rámci kterého má být vyvinuta nová generace lamel.

V této práci je provedena rešerše na téma požární ochrany uhlíkových lamel. Řešeny jsou způsoby požární ochrany a materiály z kterých jsou lamely a lepidla vyrobeny. Popsány jsou současně provedené experimenty na zesílených konstrukcích pomocí uhlíkových lamel A je navržen nový typ experimentu, který bude dále využit v rámci výzkumného projektu.

1.2 Cíle práce

Hlavní cíle práce:

1. Rešerše metody požární ochrany lamel
2. Současné provedené experimenty požární odolnosti
3. Příprava experimentu požární odolnosti uhlíkových lamel (malorozměrová zkouška)
4. Provedení experimentu požární odolnosti uhlíkových lamel
5. Zhodnocení výsledků z provedeného experimentu požární odolnosti lamel

2 Využití lamel

V dnešní době se stále častěji používají na opravy a rekonstrukce konstrukcí dodatečně jako výtzuž lamely. Stále častěji jsou v budovách zvýšené požadavky na vybavení například domácnosti, kancelářských prostorů a průmyslových hal. To zapříčiní, že je potřeba požadovat zvýšení nosnosti stávajících nosných konstrukcí budov. Bohužel není vždy možné nebo finančně proveditelné provést výměnu částí nosných konstrukcí nebo jejich masivní vyztužení ocelovými profily, a to z důvodu jako je památková ochrana, omezený přístup a další. Pro tyto případy je vhodné využít techniky dodatečného vyztužení nebo zesílení, zejména u železobetonových a zděných konstrukcí pomocí lepených uhlíkových lamel. [1]

Kde se dají lamely užít [2]:

- Zvýšení ohybové pevnosti u trámů a desek,
- omezení vzniku smykových trhlin,
- obalením sloupů zajišťují ztužení a zvýšení prostorové tuhosti konstrukce,
- betonových nosníků, sloupů, stožárů, plošných konstrukcí, mostovek, zdí, propustí a stol,
- posílení železobetonových, kovových, zděných či dřevěných konstrukcí,
- mosty,
- zesilování stropních konstrukcí.

Výhody využití lamel [2]:

- Nevyžaduje podpěry,
- umožňuje křížení lamel,
- vysoká pevnost v poměru k váze, různé pevnosti a moduly pružnosti,
- odolnost proti únavě,
- nekoroduje, dlouhodobě ověřená životnost a minimální údržba,
- libovolná délka (dlouhé stavební dílce),
- nízká hmotnost oproti ocelovým deskám umožňuje snadnou manipulaci, rychlá a jednoduchá montáž, minimální aplikační tloušťka,
- možnost užít na svislých stěnách i na spodní stranu stropních konstrukcí,
- použití ve stísněných prostorech,
- lze se vyhnout bourání přiček, lamela se jednoduše protáhne otvorem vysekaným ve zdivu.

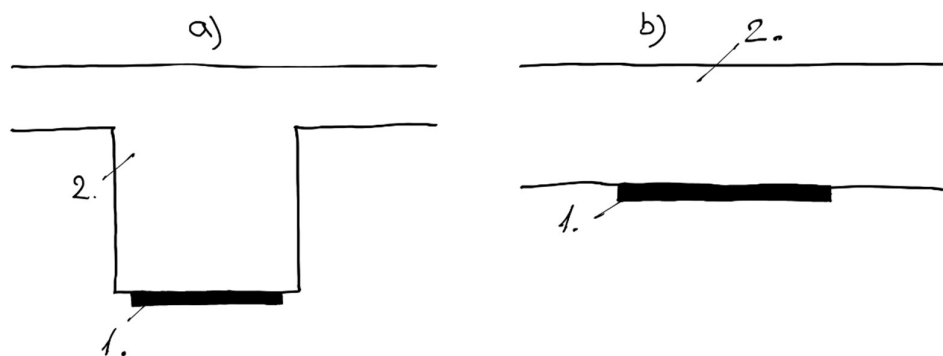
Existuje několik důvodů, proč lze využít kompozitní materiály k posílení zděných konstrukcí [3]:

- Zvyšování zatížení.
- poškození nosných prvků,
- změna statického systému,
- chyby při projektování nebo provedení.

3 Způsob uložení lamel

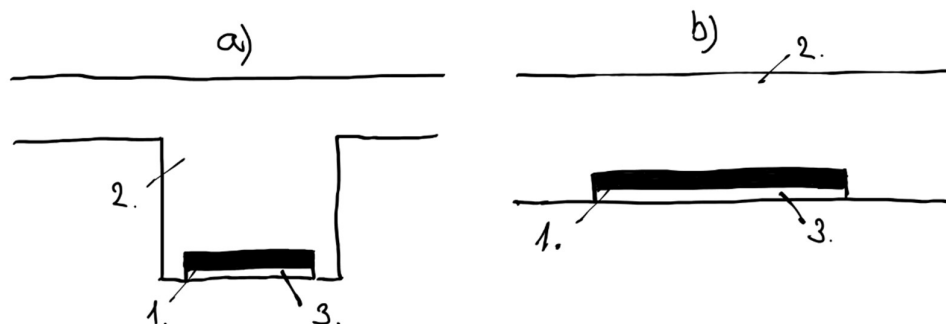
Existuje několik různých metod pro aplikaci lamel v rámci zesilování betonových konstrukcí. Mezi nejčastěji používané metody se řadí lepení lamel na povrch konstrukce, vsazování lamel do předem připravených drážek a vytvoření kompozitních vrstev. Při správné volbě a aplikaci metod lze dosáhnout optimálního spojení mezi lamelami a betonem, což přináší zvýšenou nosnost a stabilitu konstrukce. [1]

Jedním ze zmíněných způsobů, jak instalovat uhlíkové lamely, je nalepení přímo na povrch zesilované nosné konstrukce (viz obrázek 1). Výhodou tohoto instalování je rychlost a co nejmenší zásah do nosné konstrukce. Po konci instalování zůstává lamela vidět na povrchu konstrukce. Dalším krokem je použít protipožární ochrany (např. obklad) jako prostředek zakrytí lamely.



Obrázek 1 Skica uložení lamely na povrch nosné konstrukce (a) nosníku, b) desky): 1 – stávající nosná konstrukce, 2 – uhlíková lamela, 3 – protipožární podhled

Dalším z možných způsobů, jak instalovat uhlíkové lamely, je vsazování lamel do předem připravených drážek (viz obrázek 2). Výhoda vsazování spočívá v tom, že se lamela po konci instalování zakryje. Povrch instalování lamely tak zůstane v jedné rovině a skryt.



Obrázek 2 Skica uložení lamely vsazováním do nosné konstrukce (a) nosníku, b) desky): 1 – uhlíková lamela, 2 – stávající nosná konstrukce, 3 – prostor vytvořené drážky

3.1 Obecný postup aplikace

Aplikace kompozitních materiálů na konstrukci vyžaduje pečlivý postup, který zohledňuje nejen stav konstrukce, ale také technologii provedení. Základní kroky této technologie lze rozdělit do několika fází, a to zejména při zesílení stropní konstrukce pomocí uhlíkových lamel, což bude nyní podrobněji popsáno [3][4][5][6]:

„1) Příprava povrchu

Povrch, na který má být aplikována uhlíková lamela, musí být důkladně očištěn od veškerých nečistot, olejů a mastnot. Mechanické odstranění poškozených částí povrchu je nezbytné. Pokud je povrch hladký, je nutné ho zhrubnout frézováním nebo pískováním. Minimální odtrhová pevnost podkladu by měla činit $1,5 \text{ N/mm}^2$.

2) Vyrovnání nerovností

Nerovnosti podkladu nesmí přesahovat 5 mm na délku 2 metry dlouhé lamely. V případě vyšších hodnot se nerovnosti lokálně vyrovnávají epoxidovým lepidlem. Tato práce by měla být provedena alespoň 24 hodin před aplikací uhlíkových lamel. Při rozsáhlejších úpravách se používá speciální vyrovnávací malta na cementové bázi. Důležité je také sledovat vlhkost podkladu, která by neměla překročit 4%.

3) Teploty při provádění

Před zahájením prací je nezbytné stanovit teplotu podkladu, relativní vlhkost a okolní teplotu. Při teplotě podkladu nižší než 3°C je nutné jej ohřát. Teplota by během aplikace uhlíkových lamel neměla klesnout pod 8°C ani přesáhnout 35°C . V případě trvale nižších teplot je nezbytné použít speciální lepidlo pro nízké teploty, schopné aplikace až do -10°C .

4) Lepení uhlíkových lamel

Proces lepení uhlíkových lamel zahrnuje několik kroků. Lamela musí být nejprve řádně očištěna a zkrácena na požadované rozměry konstrukce. Poté následuje aplikace epoxidového lepidla v tloušťce 2 mm na uhlíkovou lamelu. Tato vrstva lepidla zajišťuje správné zarovnání lamely s konstrukcí. Minimální tloušťka lepidla činí 1 mm, maximální 3 mm. Po aplikaci uhlíkové lamely na konstrukci následuje přitlačení pomocí speciálního válečku. Vzhledem k nižší požární odolnosti epoxidových lepidel v rozmezí 60°C až 80°C je důležité chránit uhlíkové lamely dodatečnými protipožárními opatřeními, přičemž se často využívají protipožární desky.“

4 Vlákna lamel

V této kapitole si přiblížíme vlastnosti lamel a jejich druhy. Druhy lamel se dají rozdělit podle toho, z jakých jsou vyrobeny vlákna. Vlákna mohou být přírodní nebo syntetická. Druhy vláken se dají dále rozdělit na čtyři nejčastěji používané, jako jsou uhlíková, skleněná, aramidová a přírodní vlákna.

4.1 Uhlíková vlákna (CF)

Nejčastěji využívané kompozitní materiály ve stavebnictví jsou zpravidla z uhlíkových vláken (viz obrázek 3), a to díky výjimečně vysokému modulu pružnosti v tahu, který se pohybuje až k hodnotám 600 GPa a vysoké pevnosti v tahu až do 4000 MPa. Tato kategorie zahrnuje uhlíkové lamely, uhlíkové tyče a uhlíkové tkaniny. [7]

Uhlíková vlákna, zkráceně označovaná jako CF (Carbon Fiber), mají průměr v rozmezí od 5 do 10 mikrometrů. Tato vlákna jsou převážně složena z více než 90% uhlíku, s méně než 7% dusíku, méně než 1% kyslíku a méně než 0,3% vodíku. [8][9]

Jejich významné charakteristiky zahrnují mimořádně vysokou pevnost, tuhost, odolnost vůči korozi, dobré tepelné vlastnosti a schopnost vést elektřinu. Jejich jedinou nevýhodou je nízká tažnost. Navíc uhlíková vlákna jsou odolná vůči dlouhodobému dynamickému namáhání. V porovnání se skelnými vlákny mají také výhodu nižší hmotnosti. [8][9]

Tato lehkost se projevuje v praxi snadnější manipulací s materiálem a, což je zvláště důležité, eliminuje potřebu těžkých mechanismů při aplikaci uhlíkové lamely. Na rozdíl od tradičních metod zesilování, například stropních konstrukcí a překladů, kde je nutné konstrukci podstavovat k odlehčení, u uhlíkových lamel tato potřeba odpadá. [1][7][10]

Celkově lze vyjádřit výhody uhlíkových lamel následovně:

- Malá hmotnost v porovnání s jejich nosností.
- Snadná manipulace a přeprava materiálu.
- Časová efektivnost při použití v technologii ve srovnání s tradičními metodami zesilování konstrukcí.
- Nízká objemová hmotnost (1650 kg/m^3).

Nevýhodou uhlíkových lamel je jejich malá odolnost vůči UV záření a cena uhlíkové lamely (pro srovnání 1 m uhlíkové lamely je 6 x dražší než 1 m ocelové příložky). Uhlíkové lamely jsou zároveň velmi křehké, proto manipulace musí být prováděna velmi opatrně. Porovnáme-li si tradiční způsoby zesilování, můžeme dojít k jednoznačnému závěru, že aplikace uhlíkových lamel je poměrně finančně náročná. Je nutné si ale uvědomit, že počáteční finanční náklady se nám vrátí zpět v podobě času, který pracovníci ušetří při samotné aplikaci uhlíkové lamely. Při aplikaci je nutné dodržovat správný technologický postup, který je uveden v kapitole 3.1. [1][7][10]



Obrázek 3 Uhlíková vlákna [11]

4.2 Skleněná vlákna (GF)

Dalším materiálem, používaným k výrobě kompozitních materiálů, jsou skleněná vlákna (viz obrázek 4), která ve stavebnictví nalézají menší uplatnění než uhlíková vlákna. Skleněná vlákna mají charakteristický modul pružnosti v tahu kolem 60 GPa a pevnosti v tahu kolem 1000 MPa. Jsou přednostně využívána k posilování anorganických materiálů, například betonu, malt a sklocementových výrobků. Dále se používají k vyztužení sádry a v některých případech i k posílení keramiky. [12]

Skleněná vlákna, často označovaná zkratkou GF (Glass Fiber), jsou tenká vlákna kulatého průřezu s průměrem mezi 3,5 a 24 mikrometry. Skleněná vlákna jsou klasifikována pod různými označeními E (electric), C (chemicky odolné) a R (resistence) podle jejich složení skla. Nejběžněji používaným typem skelných vláken po celém světě je sklo označované jako E. [8][9]



Obrázek 4 Skleněná vlákna [13]

4.3 Aramidová vlákna (AF)

Poslední kategorií kompozitních materiálů vhodných pro stavebnictví jsou výrobky z aramidových vláken (viz obrázek 5), s aramidovými tyčemi představujícími nejrozšířenější variantu. Modul pružnosti v tahu aramidových tyčí se pohybuje kolem 100 GPa. Při přímém srovnání se skleněnými tyčemi lze pozorovat, že aramidové tyče mají o přibližně 40 GPa vyšší modul pružnosti, což je činí druhou nejlepší volbou po uhlíkových kompozitech. Pevnost v tahu se pohybuje kolem 2000 MPa. [3][14][15]

Aramidová vlákna, zkráceně označovaná jako AF (Aramid Fiber), jsou syntetická vlákna známá pod obchodním názvem Kevlar. Elementární aramidová vlákna mají kruhový průřez s průměrem přibližně 12 mikrometrů a lehce drsný povrch. Tato vlákna se vyznačují vysokou pevností a tuhostí a řadí se mezi nejlehčí materiály pro vyztužení. Je třeba poznamenat, že mají výrazně nižší pevnost v tlaku než v tahu, a proto se často používají v konstrukcích, které jsou převážně vystaveny tahovým namáháním. [8][9]

Aramidová vlákna mají tendenci absorbovat vlhkost, a proto je nutné je před použitím důkladně vysušit, aby nedocházelo k oslabení spoje mezi vláknem a maticí nebo ke snížení pevnosti vlákna. [8][9]



Obrázek 5 Aramidová vlákna [16]

4.4 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna (viz obrázek 6) se dělí na dvě hlavní kategorie podle jejich původu: rostlinná a zvířecí vlákna. Pro vyztužování plastů jsou však vhodná pouze rostlinná vlákna. Mezi příklady rostlinných vláken patří len, bavlna, konopí, juta, sisal a ramie, přičemž len a juta jsou nejčastěji používané. [8][9][17]

Rostlinná vlákna mají několik výhod, včetně odolnosti vůči stárnutí, vysoké pevnosti v tahu, nízké hustoty a výhodného způsobu likvidace spalováním. Na druhou stranu mají i některé nevýhody, jako je závislost na podmínkách růstu, omezená délka vlákna, citlivost na vlhkost a riziko rozkladu vláken při vysokých teplotách. [8][9][17]



Obrázek 6 Přírodní vlákna [18]

5 Pryskyřice

Pro spojení vláken a nalepení lamel k porušeným konstrukcím slouží pryskyřice. Základní typy pryskyřic jsou [8][9][19]:

- Nenasycené polyesterové pryskyřice
- Vinylesterové pryskyřice (VE-R)
- Epoxidové pryskyřice (EP-R)
- Fenolické pryskyřice (PF-R)

6 Způsoby ochrany před zvýšenými teplotami

Hlavním nedostatkem systému zesílení s využitím kompozitních materiálů je jeho minimální odolnost vůči vysokým teplotám, což ho v porovnání s jinými materiály činí citlivým na kritické teploty kolem 200-300 °C, při kterých ztrácí schopnost fungovat. Při požáru dochází k tavení epoxidových pryskyřic, používaných jako pojivo pro lamely a vrstvu připevněnou k podkladu. Toto tavení způsobuje ztrátu spojení s nosnou konstrukcí a lamely tak ztrácejí svou funkčnost. Dokonce i při lokálním požáru jsou epoxidové pryskyřice a uhlíkové lamely vystaveny vysokým teplotám, což může způsobit jejich vzplanutí, jelikož jsou hořlavými materiály. [20]

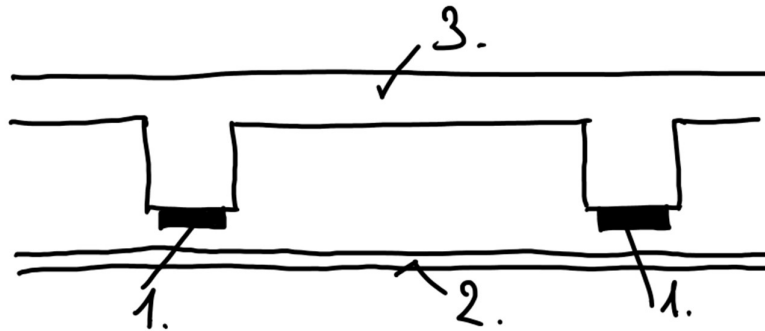
Pro řešení těchto negativních jevů při návrhu konstrukce se obvykle používají protipožární podhledy, jako jsou sádrokartonové desky nebo jiné nehořlavé materiály. Tato opatření však zvyšují náklady na rekonstrukci, což může být nevýhodné, zejména v situacích, kde není kromě požární ochrany žádný další důvod pro použití podhledu, například ve výrobních halách nebo v suterénech. Navíc taková opatření komplikují použití těchto lamel v prostorách s omezenou světlou výškou nebo v budovách s historickou hodnotou. [20]

Výsledky testů provedených na lamelách s různými ochrannými opatřeními ukazují, že správně navržené a aplikované systémy ochrany dokážou výrazně zlepšit požární odolnost konstrukcí. Například studie provedená Bockem a Popovics [21] ukázala, že lamely s obkladem dosahují výrazně delší doby odolnosti vůči vysokým teplotám ve srovnání s nechráněnými lamelami.

Rozdělit se dají do třech skupin podle způsobu, jak vypadá krycí vrstva. Jedná se o podhled, obklad a povrchové úpravy. Následující přehled vychází z informací uvedených v [20]:

6.1 Podhled

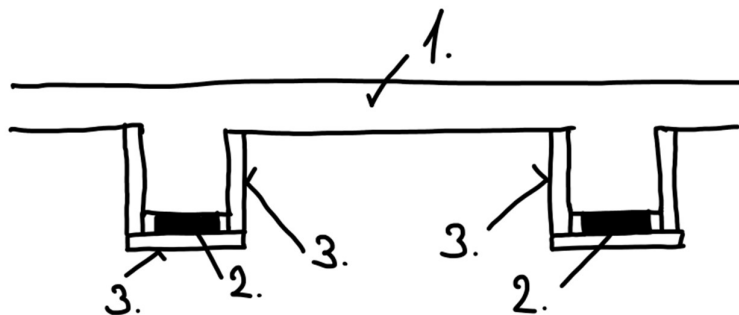
Přední a nejčastěji používané řešení spočívá v zakrytí zesílených konstrukcí pomocí požárního podhledu (viz obrázek 7). Toto řešení je sice relativně nákladné, ale má také vliv na zatížení a světlou výšku daného prostoru. Na druhou stranu má tato metoda využití nejen pro ochranu stropních konstrukcí před požárem, ale může být také využita pro vedení instalací, vzduchotechniky a dalších prvků (přičemž je důležité zajistit, aby tyto instalace samy nebyly zdrojem požáru, což může zvýšit náklady).



Obrázek 7 Skica ochrany lamel podhledem: 1 – stávající nosná konstrukce, 2 – uhlíková lamela, 3 – protipožární podhled

6.2 Obklad

Jednou z dalších možností je použití protipožárních obkladů okolo uhlíkových lamel (viz obrázek 8). Toto řešení vyžaduje značnou práci, ale má tu výhodu, že jen minimálně ovlivňuje světlou výšku daného prostoru. Obklady se používají v různých tloušťkách podle potřebné doby požární odolnosti a typem výrobce. Studie ukázaly, že správně navržený a aplikovaný obklad dokáže zlepšit požární odolnost konstrukce a zabránit poškození lamel [21].

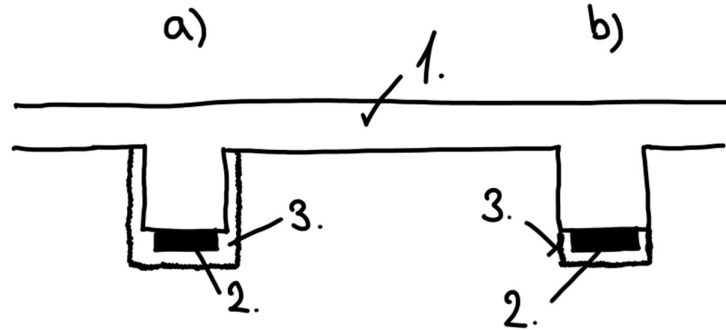


Obrázek 8 Skica ochrana lamel obkladem: 1 – stávající nosná konstrukce, 2 – uhlíková lamela, 3 – protipožární obklad

6.3 Nátěry, nástřiky a omítky

Posledním možným řešením jsou protipožární nátěry, nástřiky, omítky a stěrky (viz obrázek 9). Tato metoda je relativně rychlá, ale zároveň nákladná. Nevýhodou je potřeba aplikovat několik vrstev pro dosažení vyšší požární odolnosti, což způsobuje delší montážní přestávky. Estetický vzhled současných protipožárních omítek a nástřiků je dalším

negativem, neboť se často jedná o hrubozrnné směsi, které musí být použity jako finální povrchová vrstva. Například použití tepelně izolačních vrstev (nátěrů a nástříků) může snížit přenos tepla na lamely a tím zvýšit jejich odolnost vůči vysokým teplotám [22]. Další možností je použití refrakterních materiálů, které odolávají vysokým teplotám a zabraňují přímému kontaktu s ohněm [22].



Obrázek 9 Skica ochrany nástříkem, a) okolo celého nosníku, b) nástřík aplikován jen na spodní stranu nosníku: 1 – stávající nosná konstrukce, 2 – uhlíková lamela, 3 – protipožární nástřík

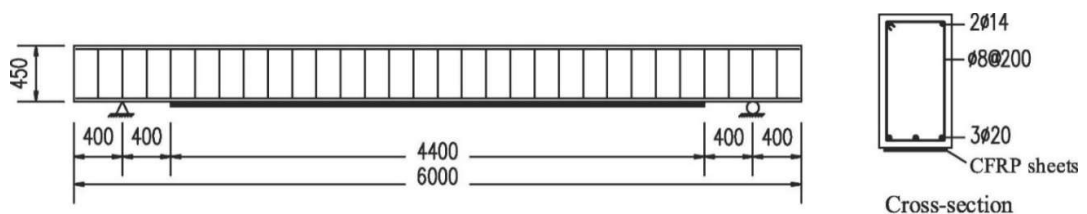
7 Současně provedené experimenty

7.1 Zkoušky požární odolnosti železobetonových nosníků zesílených CFRP s různými způsoby ochrany [23]

7.1.1 Popis experimentu

Tato studie naznačuje, že udržení teploty FRP pod teplotou skelného přechodu (tj. 62 °C) po 1,5 hodině vystavení ohni vyžaduje použití výrazně efektivní izolační vrstvy, například obkladu z kalcium-silikátových desek o tloušťce 70 mm. V opačném případě byl považován zpevňující systém FRP za ztracený bez ohledu na použití relativně tenké izolační vrstvy.

Všechny vzorky (viz obrázek 10) měly celkovou délku 6 000 mm a plochu průřezu 250 mm x 450 mm (šířka x výška), odpovídající horizontální peci. Požární pec byla 4500 mm dlouhá a 3000 mm široká. V průběhu zkoušky požární odolnosti byl každý nosník podepřen na dvou kovových deskách umístěných nad stěnami pece, se světlým rozpětím 5 200 mm. Všechny vzorky byly monotónně zatěžovány pomocí čtyřbodového ohybového testu až do dosažení porušení. Dvě bodová zatížení byla aplikována roznášecím nosníkem ve vzdálenosti 1 500 mm.



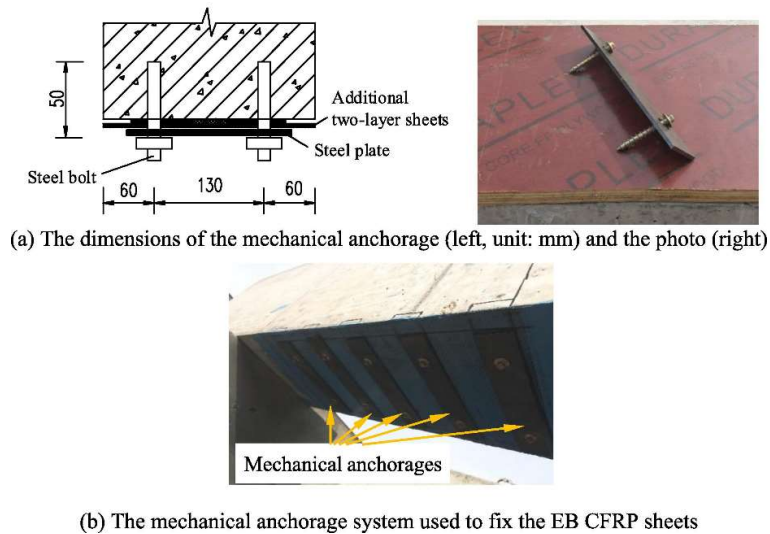
Obrázek 10 Geometrie a detaily ocelové výztuže, převzato z [23], Fig. 3.

Kompozit CFRP, použitý pro zesilující systém, byl vytvořen z jednosměrných listů složených z vysokopevnostní tkaniny z uhlíkových vláken (komerčně známé jako Forrisio-CF30). Tyto pásy byly aplikovány na místo prostřednictvím postupu mokrého kladení a impregnovány

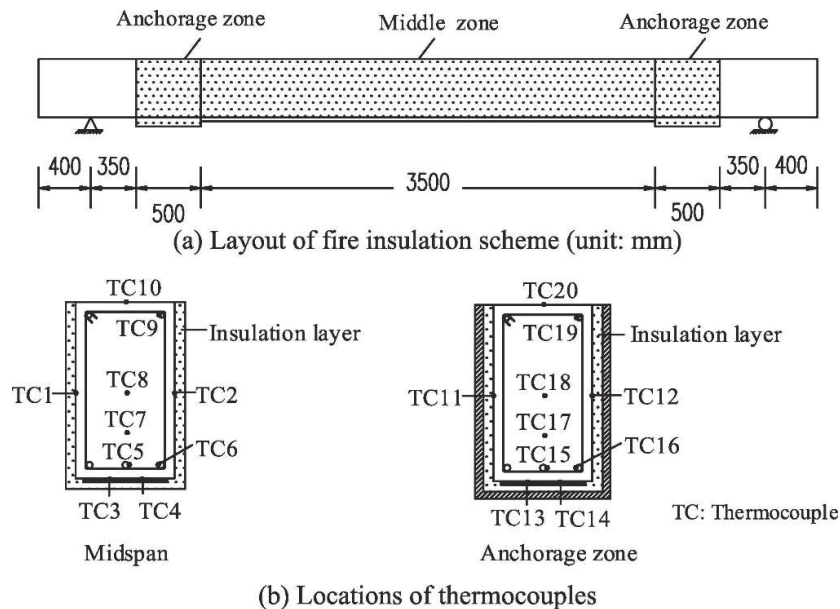
epoxidovým lepidlem s vysokou viskozitou (komerčně známým jako Forrisio-CFA). Samotné lepidlo bylo připraveno smícháním epoxidové pryskyřice (složky A) a tužidla (složky B).

Byla navržena hybridní dvousložková izolační vrstva (viz obrázek 12), která by nahradila původní 70mm vrstvu SJ-2 a významně snížila celkovou tloušťku izolace. Tato hybridní izolace se skládá z 20 mm vrstvy SJ-2 a vrchního bobtnavého povlaku o tloušťce 2 mm (tj. Interchar-1120).

Prvky B2 a B3 byly testovány pro studium vlivu různých izolačních materiálů na zvýšení požární odolnosti izolovaných železobetonových nosníků zesílených CFRP, zatímco B3 a B4 byly testovány pro zkoumání účinku mechanického kotvení (viz obrázek 11).



Obrázek 11 Systém mechanického kotvení, převzato z [23], Fig. 4.

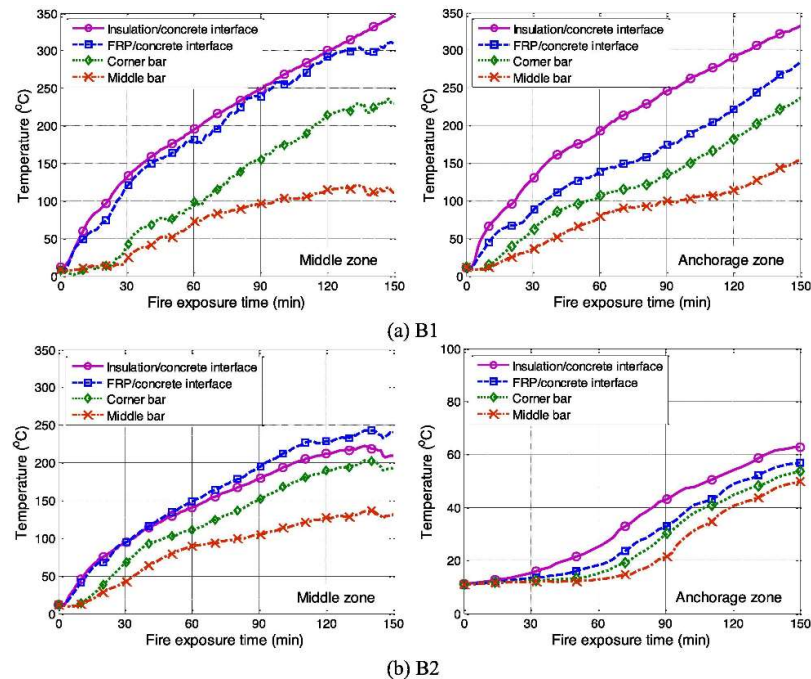


Obrázek 12 Ilustrace způsobu ochrany a termočlánků, převzato z [23], Fig. 5.

7.1.2 Průběh a výsledek experimentu

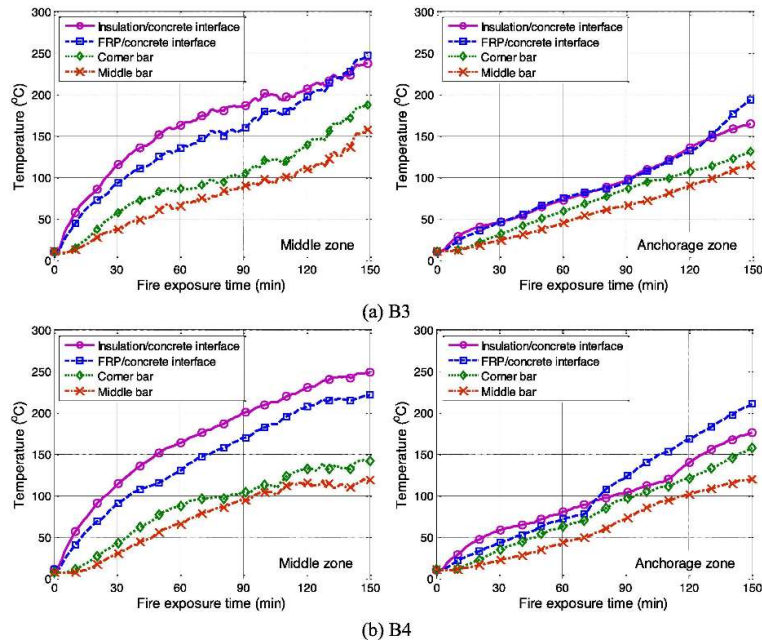
Všechny izolované železobetonové nosníky zesílené CFRP byly schopny bez problémů odolávat požáru v souladu s normou ISO 834 po dobu 2,5 hodiny (viz obrázek 13). Během první série testů požární odolnosti byly pozorovány drobné trhliny na povrchu izolace asi 10 minut po zahájení zkoušky. Při této zkoušce nebyla zaznamenána žádná delaminace ani odlupování izolační vrstvy SJ-2 od nosného nosníku, což potvrzuje účinnost poskytované ochrany vrstvou izolace. Po ukončení testu požární odolnosti dosáhla maximální šířka trhliny izolační vrstvy SJ-2 přibližně 5 mm. Po odstranění izolační vrstvy SJ-2 bylo pozorováno oddělení desek CFRP od betonu poblíž středního rozpětí.

Epoxidová pryskyřice použitá k impregnaci uhlíkových vláken byla částečně spálena, a zůstala pouze volná vlákna. V oblasti kotvení B2 však nebyla zaznamenána delaminace desek CFRP, zejména díky vynikající ochraně poskytované vrstvou SJ-2 o tloušťce 70 mm.



Obrázek 13 Naměřená teplota v závislosti na době požáru pro první sérii požární zkoušky, převzato z [23], Fig. 13.

Během druhé série zkoušek požární odolnosti (viz obrázek 14) byl v peci po 5 minutách od zapálení pozorován únik bílého a dráždivého kouře, pravděpodobně způsobeného vytvářením bobtnavých a zuhelnatělých vrstev Interchar-1120. Na straně vrstvy SJ-2 ve střední zóně každého nosníku se objevilo několik bočních trhlin. Po ukončení zkoušky požární odolnosti bylo zjištěno, že desky CFRP ve středních zónách B3 se odtrhly od betonového podkladu a po odstranění izolační vrstvy SJ-2 visely na spodní části nosníku.



Obrázek 14 Naměřená teplota v závislosti na době požáru pro druhou sérii požární zkoušky, převzato z [23], Fig. 14.

7.1.3 Závěr experimentu

Závěr experimentu se dá popsat následujícími body:

- Vrstvy desek z kompozitu CFRP vykazovaly při požáru zvýšení mezí kluzu a mezních zatížení vyztužených nosníků ve srovnání s nevyztuženým železobetonovým nosníkem.
- Způsob ochrany použitý při zkouškách požární odolnosti poskytl požadovanou požární odolnost. Všechny byly schopny odolávat zahřívání po dobu 2,5 hodiny bez strukturálních poruch. Maximální naměřené teploty výztuže nepřesáhly 250 °C po 2,5 hodinách vystavení požáru, což je výrazně pod kritickým teplotním limitem (tj. 593 °C) stanoveným současnými stavebními předpisy.
- V oblasti kotvení CFRP se teplota držela pod bodem skelného přechodu po 2,5 hodinách. Dosaženo toho bylo pomocí izolační vrstvi 70 mm. Ale po uvolnění CFRP v oblasti kotvení došlo k prudkým nárůstům středních průhybů, a to není optimální řešení do budoucna.
- Kombinací mechanického kotvicího systému s vhodným izolačním schématem může poskytnout spolehlivou metodu pro omezení středních průhybů nosníku. Zejména v pozdějších fázích zkoušky požární odolnosti je tomu dosaženo díky lanovému mechanismu desek CFRP, který vzniká mezi kotevními oblastmi.

7.2 Experimentální chování železobetonových nosníků vyztužených FRP vystavených návrhovému požáru [24]

7.2.1 Popis experimentu

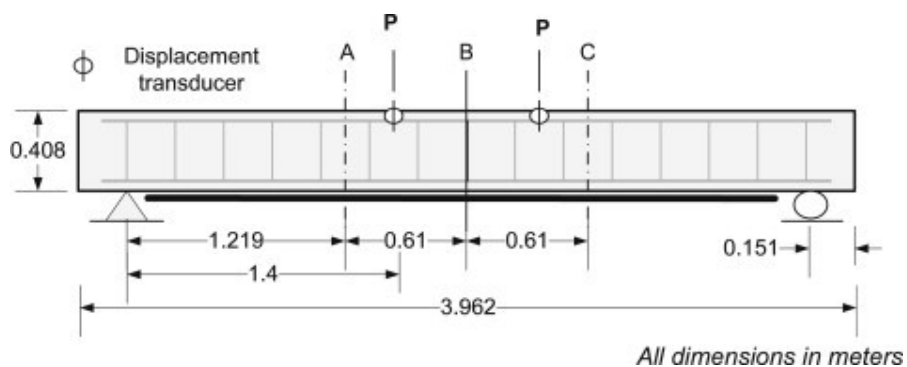
V této studii jsou prezentovány výsledky experimentů požární odolnosti na pěti obdélníkových železobetonových nosnících. Čtyři z těchto železobetonových nosníků byly testovány po zpevnění polymerem vyztuženým uhlíkovými vlákny (CFRP), zatímco pátý byl použit jako kontrolní vzorek nezesíleného železobetonového nosníku. Nosníky byly vystaveny kombinovanému působení požárního a provozního zatížení. Testovací proměnné zahrnovaly typ vystavení požáru, kotvení zónu, typ izolace a podmínky omezení. Získaná data z požárních zkoušek slouží k vyhodnocení tepelné a strukturální odezvy, stejně jako identifikaci vzorů poruch v železobetonových nosnících zpevněných FRP.

Nosníky měly rozměry 254 mm x 406 mm a rozpětí 3 960 mm (viz obrázek 15). Železobetonové nosníky byly vybaveny třemi spodními výztužemi \varnothing 6 mm a dvěma horními výztužemi \varnothing 4 mm. Jako smyková výztuž byly použity třmínky \varnothing 6 mm, které byly rozmístěny v intervalech po 150 mm.

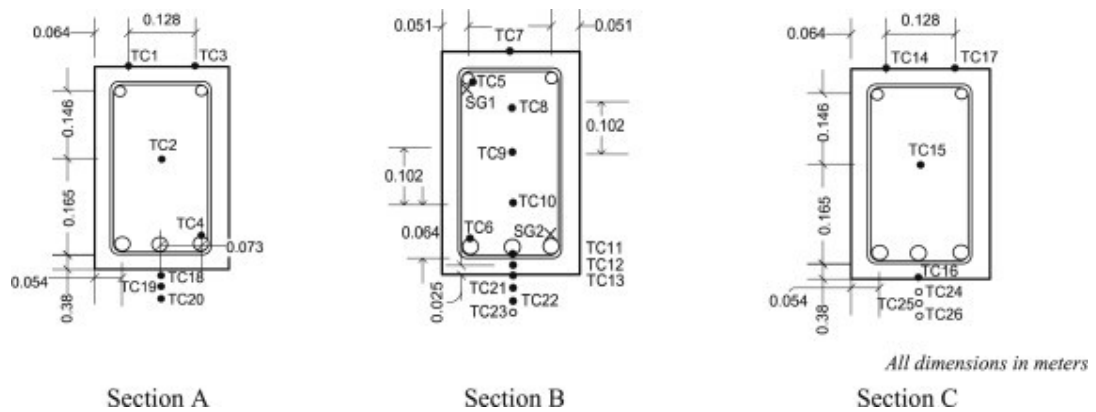
Čtyři z železobetonových nosníků (označených B1–B4) byly zesíleny pásy z CFRP s cílem zvýšit jejich pevnost v ohybu o 50 %. Betonový povrch, který byl díky rovnoměrnému bednění poměrně hladký, byl upraven otryskáním pískem, aby částečně odhalil kamenivo na spodní straně nosníku. U nosníků B1 a B2 bylo CFRP aplikováno na celou nepodepřenou délku nosníku (3,66 m) a zbytek vzdálenosti je pro podpory. U nosníků B3 a B4 bylo CFRP aplikováno pouze na střední část nosníku v délce 2,44 m, která byla vystavena požáru. Tato proměnlivá konfigurace uspořádání FRP byla zavedena pro studium vlivu chladnějších kotvených zón na požární odezvu železobetonových nosníků vyztužených FRP.

Zesílené nosníky byly vytvrzovány po dobu 72 hodin a následně na ně byl aplikován nástřik pomocí systému pokročilé požární ochrany (AFP) Tyfo® odolného proti povětrnostním vlivům, což představuje vylepšenou verzi oproti dříve používanému systému Tyfo® AFP.

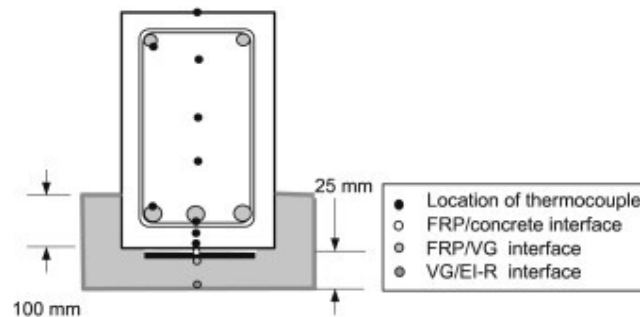
Nosníky byly vybaveny termočlánky typu K umístěnými ve třech různých úsecích podél rozpětí nosníku (viz obrázek 16 a 17), aby byly měřeny teploty v různých hloubkách v betonu, ve výztuži a na rozhraní FRP/beton a FRP/izolace. Každý nosník byl vybaven celkově 27 termočlánky. Pro sledování průhybů byly namontovány na každý nosník tři lineární proměnlivé diferenciální převodníky – jeden ve středním rozpětí a dva pod bodovým zatížením.



Obrázek 15 Geometrie a určení řezů A, B a C, převzato z [24], Fig. 1.



Obrázek 16 Podrobnosti o průřezu a umístění termočlánků a tenzometrů, převzato z [24], Fig. 1.



Obrázek 17 Průřez středního rozpětí ukazující umístění termočlánků, převzato z [24], Fig. 1.

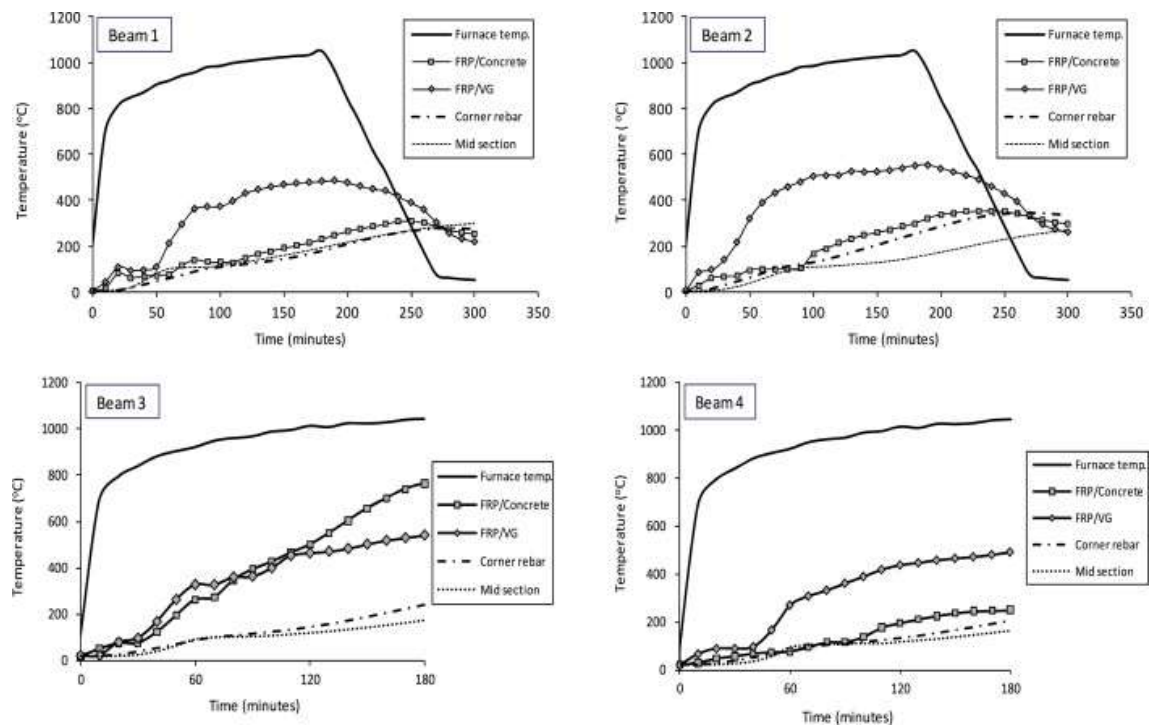
7.2.2 Průběh experimentu

Zatížení bylo aplikováno přibližně 30 minut před začátkem simulace požáru, dokud nebylo dosaženo ustáleného stavu, což se projevilo nulovým zvýšením průhybu v průběhu času. Tato doba byla zvolena jako výchozí podmínka pro sledování průhybů v nosníku.

Požární podmínky představovaly běžný scénář požáru v části budovy, kde je střední část nosníku vystavena ohni.

Naměřené teploty (viz obrázek 18) výztuže v nosníku B3 jsou vyšší než u zbývajících tří izolovaných nosníků, protože 1/4 rozpětí podhledu nosníku byla přímo vystavena ohni poté, co se FRP v průběhu zkoušky oddělil. V nosníku B2 vykazovala výztuž mírně vyšší teploty z důvodu časného vzniku trhlin v izolaci. Je patrné, že výztuž v železobetonovém nosníku dosáhne vysoké teploty 593 °C po 180 minutách. Avšak u všech železobetonových nosníků vyztužených FRP je teplota výztuže výrazně nižší než 400 °C po 3 hodinách vystavení ohni.

V případě železobetonových nosníků vyztužených FRP byl zaznamenán náhlý nárůst průhybu po 20 minutách. Tuto změnu lze připisovat ztrátě vazby na rozhraní mezi FRP a betonem v důsledku zvyšující se teploty. Detailní prozkoumání odhalilo, že teplota v oblasti FRP přesáhla teplotu skelného přechodu epoxidu během prvních 20 minut účinku požáru.



Obrazek 18 Naměřené teploty jako funkce doby požární expozice pro nosníky B1 – B4, převzato z [24], Fig. 3.

7.2.3 Závěr experimentu

Závěr experimentu se dá popsat následujícími body:

- U železobetonových nosníků vyztužených FRP dochází k porušení výrazně po dosažení teploty skelného přechodu. Rozsah, ve kterém se porucha projevuje, závisí především na úrovni teploty výztuže, jež je ovlivněna izolačními vlastnostmi.
- Pokud je ukotvení FRP mimo požární zónu přispívá k únosnosti železobetonových nosníků vyztužených FRP prostřednictvím lanového mechanismu, jenž je zajištěn nespojenými souvislými vlákny na spodní straně nosníku.
- Izolace efektivně přispívá ke snížení průhybů železobetonových nosníků vyztužených FRP tím, že reguluje nárůst teploty v betonu a ocelové výztuže.
- Odlepení FRP může vystavit část nebo celý spodní povrch nosníku přímému tepelnému toku. K dosažení dobré požární odolnosti železobetonových nosníků vyztužených FRP je proto nezbytná správná konfigurace a pečlivá aplikace izolace.

7.3 Požární chování železobetonových nosníků zesílených CFRP v plném rozsahu chráněných různými izolačními systémy [25]

7.3.1 Popis experimentu

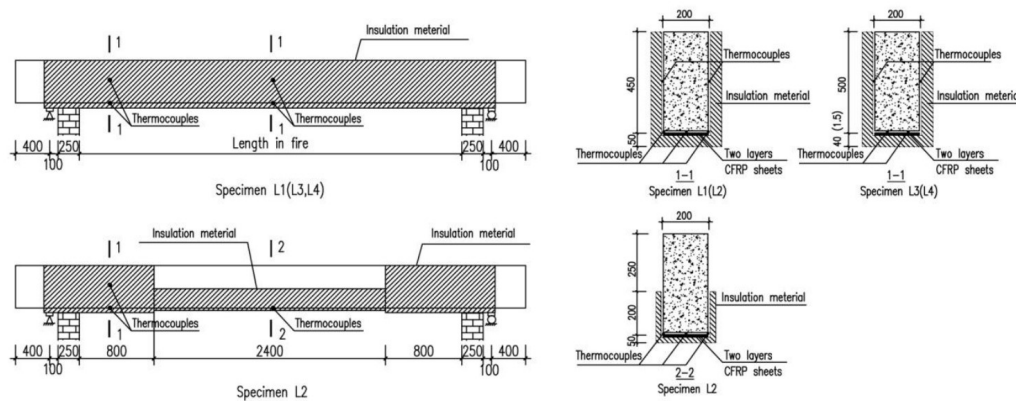
V této studii je prezentována série experimentů, jejichž cílem bylo zkoumat požární chování izolovaných železobetonovými nosníků, které jsou vyztuženy polymery s uhlíkovými vlákny (CFRP).

Byly provedeny testy čtyř železobetonových nosníků, které byly zesíleny pomocí CFRP, a byly izolovány pomocí silného nátěru, ultratenkého nátěru, a kalciumsilikátových desek.

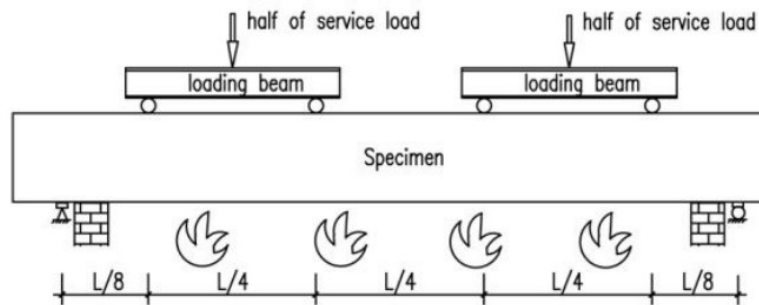
Tyto nosníky byly podrobeny standardní zkoušce ISO834 na odolnost vůči požáru. Uspořádání zkoušky je znázorněno na obrázku 20.

Čtyři vzorky pro požární zkoušky, označené jako L1, L2, L3 a L4, se skládaly z obdélníkového železobetonového nosníku, zpevňujícího systému CFRP a izolačního systému (viz obrázek 19). Železobetonové nosníky vzorků L1 a L2 měly rozměry 200 mm x 450 mm a rozpětí délky 4,7 m, zatímco železobetonové nosníky vzorků L3 a L4 měly rozměry 200 mm x 500 mm a rozpětí délky 5,2 m.

Vzorky L1 a L2 byly vybaveny dvěma spodními výztužemi \varnothing 12 mm a dvěma horními výztužemi \varnothing 8 mm. Vzorek L3 byl vybaven dvěma spodními výztužemi \varnothing 16 mm a dvěma horními výztužemi \varnothing 12 mm. Poslední vzorek L4 byl vybaven třemi spodními výztužemi \varnothing 20 mm a dvěma horními výztužemi \varnothing 12 mm. Jako smyková výztuž byla použita třmínky \varnothing 6 mm, které byly rozmístěny v intervalech po 200 mm.



Obrázek 19 Podrobnosti o izolaci a termočláncu pro vzorky, převzato z [25], Fig. 1.



Obrázek 20 Uspořádání zkoušky, převzato z [25], Fig. 2.

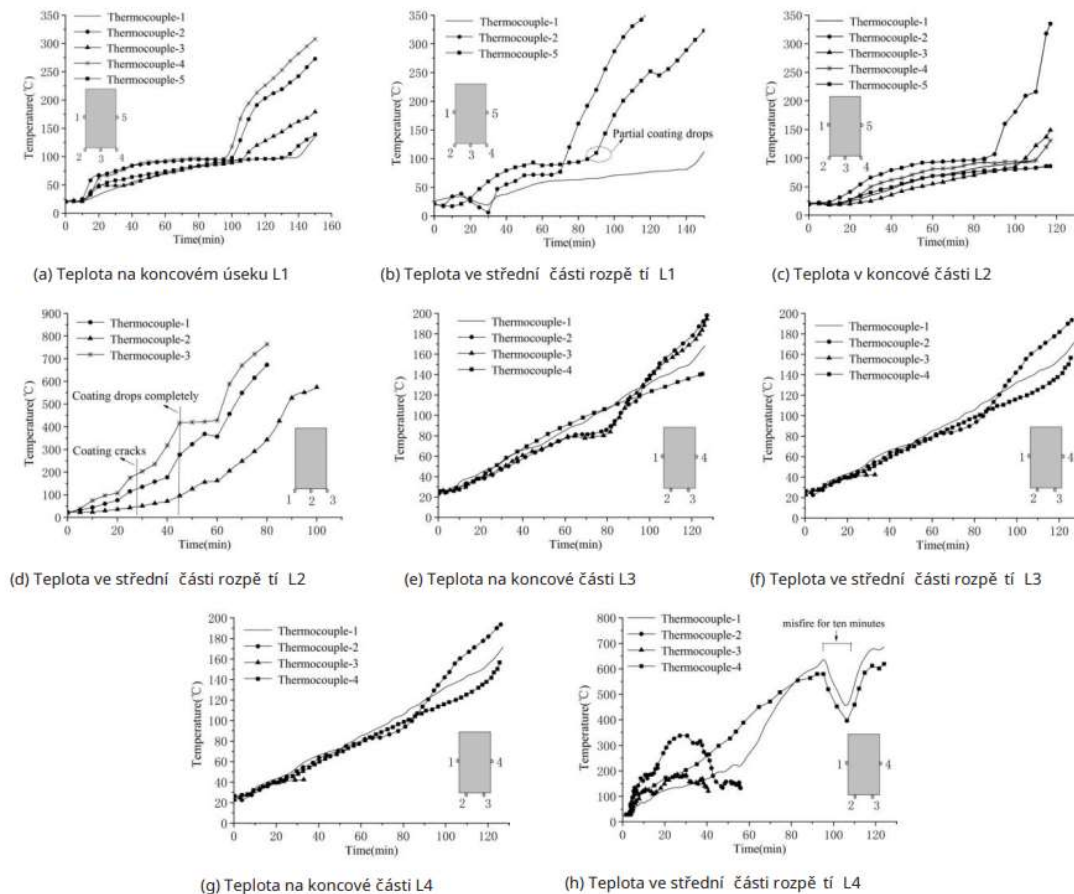
7.3.2 Tepelná odezva

Obrázek 21 ukazuje vývoj teploty v čase na rozhraní mezi CFRP a betonem pro všechny vzorky. Na obrázku 20 a), 20 c) a 20 e) je zřejmé, že teploty na rozhraních mezi CFRP a betonem vzorků L1, L2 a L3, které byly chráněny silnými ohnivzdornými nátěry a kalciumsilikátovou deskou, postupně stouply, dosahují pomalu stabilizované teploty při přibližně 100 °C. Teplota na rozhraní podhledu vzorku L1 dosáhla stabilizované teploty po 40 minutách vystavení požáru a udržela se na této úrovni přibližně 60 minut. U vzorků L2 a

L3 bylo stabilní teploty dosaženo po 40 minutách a 60 minutách od začátku testu a 60 minutách od začátku testu a 60 minutách od začátku testu a 60 minutách od začátku testu na této úrovni bylo 65 minut a 20 minut, v uvedeném pořadí.

Ve studii je uvedeno, že teplota skelného přechodu T_g lepidel použitých v testu byla přibližně 73 °C. Obrázek 21 ukazuje, že okamžik, při kterém bylo dosaženo teploty T_g , byl po 35 minutách expozice ohni pro vzorek L1, 40 minut pro vzorek L2, 55 minut pro vzorek L3 a 10 minut pro vzorek L4.

Výsledky testů naznačily, že tři zkoumané systémy poskytly uspokojivou požární odolnost pro betonové nosníky zesílené CFRP. Hlavním úkolem protipožárních izolačních materiálů bylo oddálit selhání lepidla v rané fázi a snížit zhoršení vlastností betonu a vnitřních vyztužených prutů po porušení vazby na rozhraní CFRP a betonu.



Obrázek 21 Teplota zaznamenaná na různých místech paprsků během požární zkoušky, převzato z [25], Fig. 3.

7.3.3 Závěr experimentu

Závěr experimentu se dá popsat následujícími body:

- Lze dosáhnout uspokojivé požární odolnosti 2 hodin pro betonové nosníky vyztužené CFRP, které byly izolovány pomocí silného nátěru, kalciumsilikátové desky a ultra-tenkého ohnivzdorného nátěru po celém rozpětí. Ukázalo se také, že izolace ve tvaru U pro železobetonové nosníky vyztužené CFRP je účinnou metodou.
- I když teplota T_g byla dosažena během první hodiny, vzorky L1, L3 a L4 byly schopny nést zatížení až do konce zkoušky. Výsledky naznačují, že hlavním účelem izolačních

materiálů bylo oddálit selhání lepidla v rané fázi a snížit bod selhání betonu a vnitřních vyztužených prutů v pozdějších fázích.

- Z požární zkoušky lze pozorovat, že průhyb vzorků s kotevní zónou mimo požár byl zjevně menší než průhyb vzorků s kotevní zónou v požáru. Bylo uvedeno, že účinnost vazby kotevní zóny byla klíčovým faktorem pro zajištění ohnivzdornosti. Pokud by byly všechny kotevní zóny CFRP desek vystaveny plamenům, mohla by dodatečná kotevní opatření být aplikována, což by zlepšilo požární odolnost. Efektivní ukotvení CFRP a dobře promyšlená konstrukce kotvení izolačního systému sehrály klíčovou roli při zajištění odolnosti betonových nosníků vyztužených CFRP proti ohni.
- Studie naznačuje, že tloušťka izolace, tepelná vodivost izolace, množství CFRP a poměr zatížení mají výrazný vliv na požární odolnost izolovaných železobetonových nosníků vyztužených CFRP, zatímco vliv hustoty izolace a měrného tepla nebyl zjevný.

7.4 Požární chování tepelně izolovaných železobetonových nosníků vyztužených EBR-CFRP pásy: Experimentální studie [26]

7.4.1 Popis experimentu

V této studii byla zkoumána různá protipožární schémata, včetně použití tenčí izolační vrstvy podél spodního pohledu nosníků a silnější vrstvy v kotvených zónách z CFRP.

Experimentální program se skládal z devíti zkoušek požární odolnosti provedených ve středně velké peci na železobetonových nosnících, které byly vyztuženy v ohybu pomocí pásu CFRP. Jako referenční vzorek byl také podroben testu nepevněný železobetonový nosník.

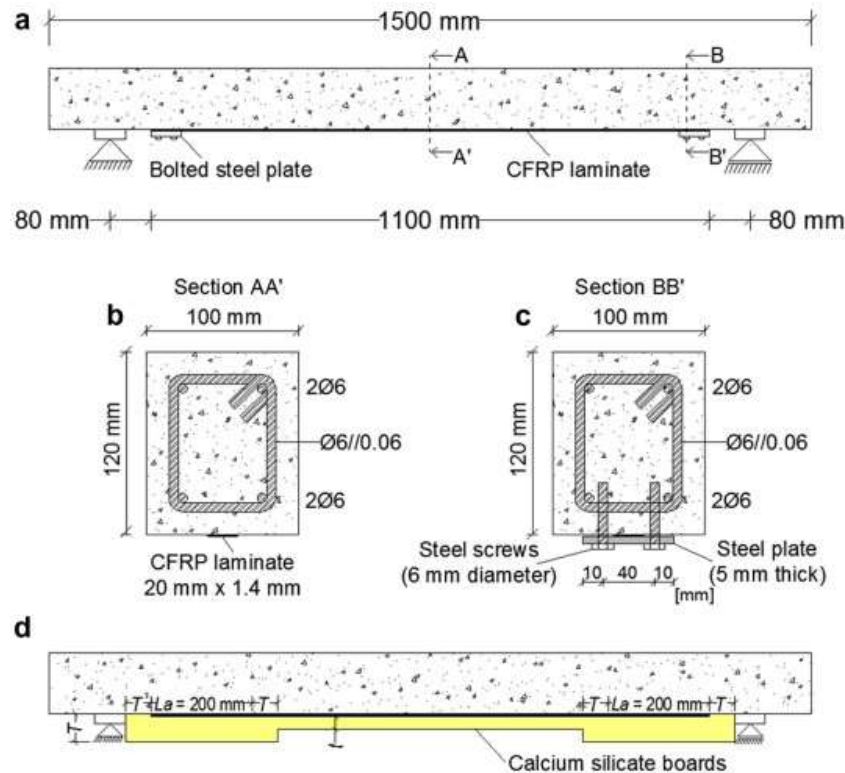
Nosníky měly rozměry 100 mm x 120 mm a rozpětí 1,50 m (viz obrázek 22). Vnitřní výztuž s krytím 1,5 cm byla tvořena čtyřmi podélnými výztužemi o \varnothing 6 mm (dvěma spodními výztužemi \varnothing 6 mm a dvěma horními výztužemi \varnothing 6 mm) a příčnými tržnínky o průměru 6 mm, které byly vzájemně vzdáleny 60 mm.

Systémy protipožární ochrany byly tvořeny kalciumsilikátovými deskami s tloušťkou v rozmezí od 25 mm do 75 mm, aplikovanými na dolní část nosníků (viz obrázek 22 d). Pasivní protipožární systémy, které byly v této studii využity, projevovaly variabilní tloušťku podél délky, obvykle vyšší v oblastech kotvení pásků CFRP. CFRP pásy, které byly využity jako externě lepená výztuž pod komerčním označením S&P Laminates CFK 150/2000, mají rozměry 20 mm (šířka) x 1,4 mm (tloušťka) a celkovou délku 1100 mm. Protipožární systémy byly sestaveny z desek CS s obchodním označením Promatect-L500, vytvořených z aglomerovaného křemičitanu vápenatého. Je třeba poznamenat, že protipožární systémy byly aplikovány pouze na spodní plochu trámů, protože pouze tato část byla přímo vystavena požáru. Tloušťka izolace se pohybuje mezi 25 mm a 75 mm, přičemž v některých případech se odlišuje v oblastech ukotvení výztužného systému a ve střední části nosníku.

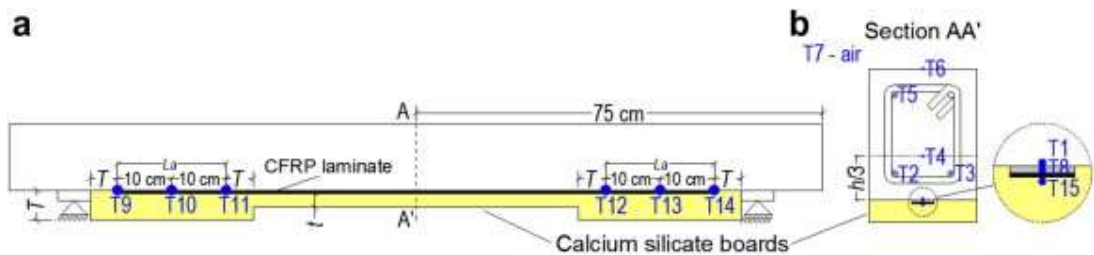
Zkoušky požární odolnosti byly prováděny ve svislé peci poháněné propanem s vnějšími rozměry 1,35 m (délka) x 1,20 m (šířka) x 2,10 m (výška). Testované nosníky byly umístěny nad otevřeným vrškem pece. Během zkoušek požární odolnosti byly všechny vzorky zatěžovány čtyřbodovým ohybem. Po uplynutí přibližně 30 minut, kdy byla zajištěna stabilizace průhybů, se začal spodní povrch nosníků tepelně zatěžovat. Teplota byla zaznamenávána pomocí termočlánků (viz obrázek 23).

Epoxid 1 představuje běžné lepidlo používané v systémech zpevnování CFRP, zatímco epoxid 2 je lepidlo s vysokou teplotou skelného přechodu (T_g). Epoxid 1 je dvousložkové epoxi-

dové lepidlo, známé pod komerčním označením S&P Resin 220, které je aktuálně využíváno pro aplikace v oblasti zpeňování CFRP. Epoxy 2 představuje další dvousložkové epoxidové lepidlo, nesoucí komerční označení Araldite 2014-1. Toto lepidlo je běžně používáno k lepení kovových nebo FRP součástí, které jsou vystaveny poměrně vysokým teplotám.



Obrázek 22 Geometrie zkušebních vzorků: (a) podélný pohled na vzorek s mechanickým ukotvením na koncích pásu CFRP ; b) průřez; c) průřez s mechanickým ukotvením; d) podélná geometrie systému požární ochrany, převzato z [26], Fig. 1.

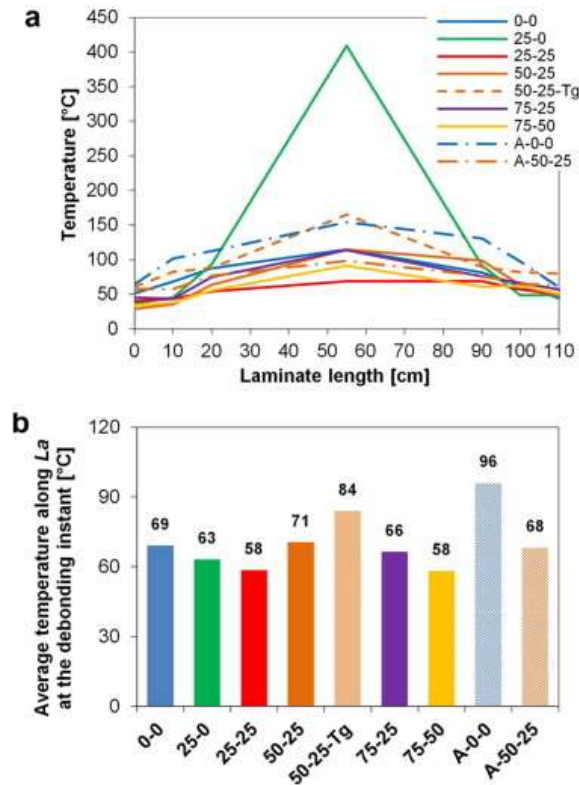


Obrázek 23 Umístění termočlánků (a) v lepidle podél lepené délky a (b) ve střední části, převzato z [26], Fig. 4.

7.4.2 Teploty

Graf z obrázku 24 znázorňuje teploty podél lepeného rozhraní pro všechny testované nosníky (měřeno termočlánky T8 až T14 z obrázku 23) v situaci, kdy se zpeňující systém CFRP oddělil od podhledu nosníků. Jak bylo očekáváno, nosníky se silnější izolací v oblastech ukotvení CFRP (ve srovnání se současnou zónou) vykazovaly vyšší teploty ve střední

oblasti, v mnoha případech výrazně převyšující teplotu skelného přechodu lepidla (47 °C), což naznačuje významnější tepelnou degradaci epoxidu. Tento výsledek byl zřetelný zejména v případě 25-0.



Obrázek 24 Teploty v lepidle, když se systém CFRP rozpojil: (a) podél lepeného rozhraní; b) průměr podél délky kotvení, převzato z [26], Fig. 6.

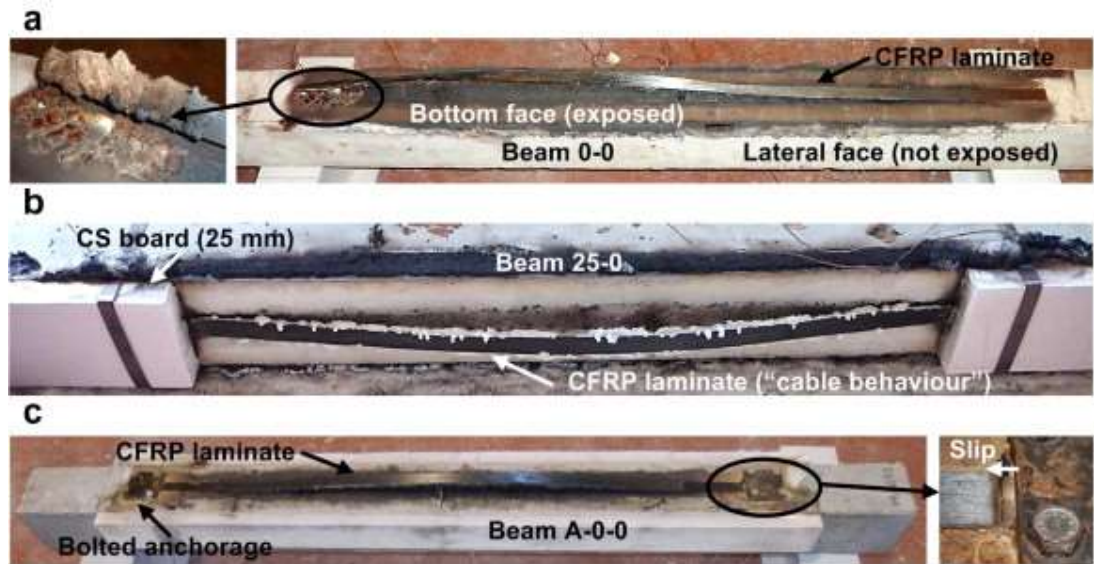
7.4.3 Výsledek

Obrázek 25 prezentuje tři zesílené nosníky (vzorky 0-0, 25-0 a A-0-0) po provedených zkouškách požární odolnosti, ilustrující různé způsoby selhání systému CFRP, které byly pozorovány při zkouškách. Spodní strana nosníku 0-0 (viz obrázek 25 a) projevovala známky tepelné degradace, kde tmavé zbarvení převážně vzniklo spálením systému CFRP. Tento obrázek rovněž ukazuje, že výztužný systém se uvolnil u levého ukotvení, kde došlo k porušení soudržnosti na délce přibližně 10 cm od konce CFRP (porucha se nachází několik milimetrů uvnitř betonu). Tato narušení lepidla jsou patrná od této délky směrem ke střední zóně nosníku. Při rozpojení pásu CFRP, i když rozložení teploty podél vrstvy lepidla bylo přibližně rovnoměrné (jak je znázorněno na obrázku 24), byly naměřeny mírně nižší teploty na koncích CFRP. Tím pádem si lepidlo udrželo vyšší pevnost spojení v oblastech ukotvení ve srovnání s centrální zónou. Je třeba zdůraznit, že tento způsob selhání byl pozorován pouze u tohoto konkrétního nosníku.

Obrázek 25 (b) naznačuje, že v případě nosníku 25-0 byla část pásu CFRP, která byla vystavena přímému působení tepla, zcela separována od betonového podkladu po skončení zkoušky. Fotky ukazují, že CFRP pás se přeměnil v "kabel" ukotvený v oblastech kotvení, kde byla tepelná degradace lepeného rozhraní zpožděna pomocí CS desek o tloušťce 25 mm. S postupujícím zvyšováním teplot se snižovala ohybová tuhost nosníku, což vedlo k

nárůstu průhybu ve středu rozpětí, stejně jako k síle v "lanku". Výztužný systém nosníku 25-0 ztratil svou strukturální účinnost po 15 minutách kvůli selhání lepidla v teplejší zóně kotvení.

U nosníků s mechanickým ukotvením na koncích CFRP (A-0-0 a A-50-25) byla porucha výztužného systému způsobena postupným skluzem CFRP pásu pod kotevní desku (viz obrázek 24 c). K tomu došlo po porušení přilnavosti na rozhraní beton-CFRP ve střední zóně nosníků, a pásek CFRP rovněž vykazoval výše popsany kabelový mechanismus.



Obrázek 25 Příklady způsobů porušení CFRP : (a) nosník 0-0; (b) nosník 25-0; (c) nosník A-0-0, převzato z [26], Fig. 8.

7.4.4 Závěr experimentu

Závěr experimentu se dá popsat následujícími body:

- Zkouška požární odolnosti provedená na neizolovaném zesíleném nosníku potvrdila náchylnost zpevňovacích systémů CFRP k vysokým teplotám/ohni; v tomto případě se pás CFRP oddělil již po 2 minutách hoření.
- Když byly přidány izolační desky na koncích CFRP si zpevňovací systém udržel strukturální účinnost prostřednictvím kabelového mechanismu po poškození lepeného rozhraní ve střední zóně.
- Konstrukční účinnost zpevňovacího systému CFRP byla výrazně zlepšena použitím silnějších izolačních desek v oblastech kotvení CFRP a využitím chování CFRP jako kabelu: s deskami CS o tloušťce 25 mm aplikovanými pouze v těchto zónách se pás CFRP oddělil po 15 minutách požáru.
- Použití lepidla s vysokou T_g ve spojení s navrženými schémata požární izolace umožnilo další prodloužení odolnosti systému CFRP: u nosníku 50-25 – T_g došlo k oddělení výztužného systému o 25 minut později než u nosníku 50-25, kde bylo použito běžné epoxidové lepidlo.
- Použití mechanického ukotvení na koncích z CFRP v kombinaci s navrženými schémata požární izolace poskytlo mírné zlepšení požární odolnosti výztužného systému. Ztráta strukturální účinnosti systému CFRP byla zpožděna díky tření zajištěnému

ocelí v kotevních deskách. Kritická teplota v zónách kotvení však byla jen mírně vyšší než v nosnících bez mechanického kotvení.

- U testovaných nosníků došlo k rozpojení výztužného systému, když průměrná teplota v lepidle v zónách kotvení dosáhla hodnot v rozmezí od $1,2 \times T_g$ do $1,5 \times T_g$, což dokazuje, že kritická teplota v kotvení zón je mírně až středně vyšší než T_g lepidla.

7.5 Požární chování železobetonových desek vyztužených CFRP pomocí různých technik – EBR, NSM a CREAtE [27]

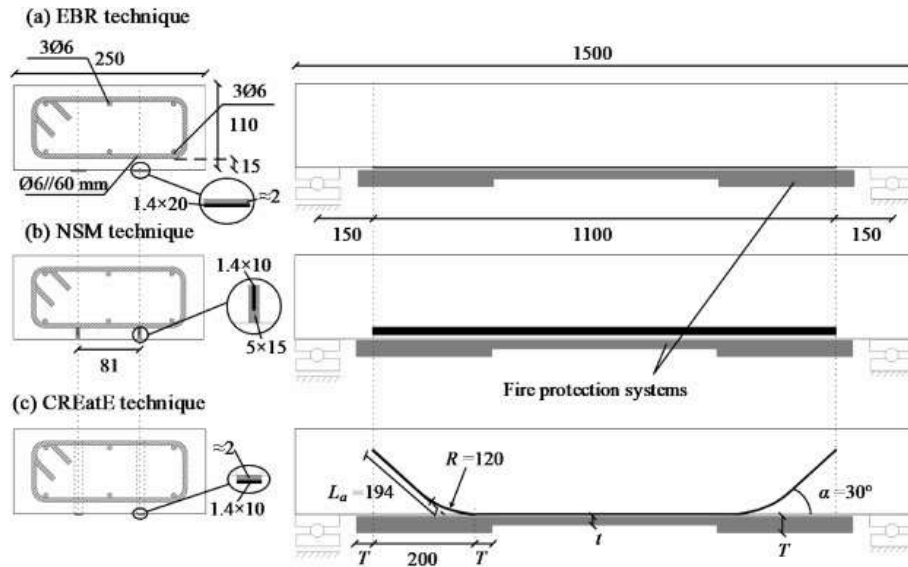
7.5.1 Popis experimentu

Tato experimentální studie je zaměřena na požární chování železobetonových desek, které byly vyztuženy pomocí pásů z polymeru vyztuženého uhlíkovými vlákny (CFRP). Pásky byly aplikovány třemi různými technikami: externě vázaná výztuž (EBR), namontované na blízkém povrchu (NSM) a souvislá výztuž zabudovaná na koncích (CREAtE) – novou technikou, která brání předčasnému odlepování CFRP.

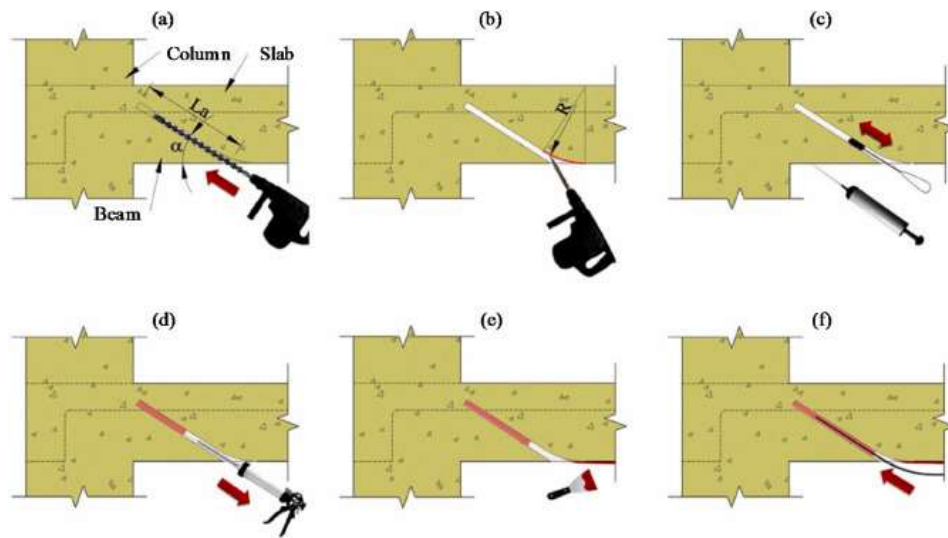
Jak již bylo zmíněno byly využity tři metody zpevňování (viz obrázek 26): EBR, NSM a CREAtE. Zatímco první dvě byly podrobně zkoumány a aplikovány k zesílení existujících železobetonových desek, třetí byla nedávno navržena. Metoda zpevňování CREAtE (viz obrázek 27) se skládá ze spojení střední části zpevňovacího materiálu podobně jako u technik EBR nebo NSM a ukotvení obou konců zpevňovacího materiálu uvnitř betonové části po přechodové křivce.

Všechny systémy CFRP zahrnovaly identické materiály pro zpevňování, a to: dva pásy CFRP (komerční označení S&P Laminates CFK 150/2000 – jednosměrná uhlíková vlákna vložená do matrice z epoxyvinylesterové pryskyřice) s průřezem $20 \text{ mm} \times 1,4 \text{ mm}$ pro techniku EBR a $10 \text{ mm} \times 1,4 \text{ mm}$ pro techniky NSM a CREAtE. A dvousložkové lepidlo na epoxidové bázi (S&P Resin 220).

Protipožární systémy byly sestaveny s použitím kalciumsilikátových (CS) desek, známých pod obchodním označením Promatect-H500. Tloušťky schémat požární ochrany zahrnovaly: žádnou izolaci jako referenci, izolaci o tloušťce 25 mm po celé délce lepené desky (desky 25/25), a tloušťku 50 mm v zónách ukotvení a tloušťku 25 mm ve střední zóně (desky 50/25).

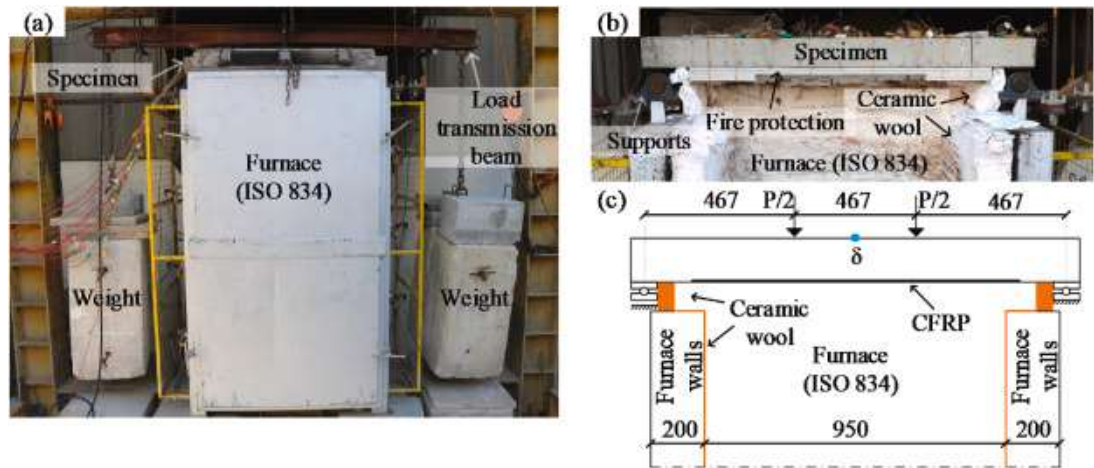


Obrázek 26 Použité techniky geometrie a zpevnění desek: (a) EBR, (b) NSM a (c) CREAtE (rozměry v mm), převzato z [27], Fig. 1.



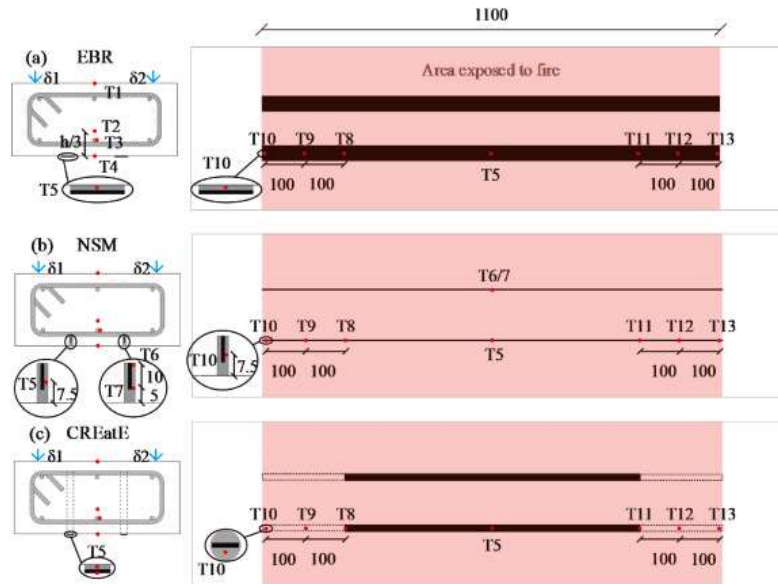
Obrázek 27 Hlavní kroky pro aplikaci zesilovacího systému CREAtE: (a) otevření otvorů o délce L_a v úhlu odchytky α ; (b) provedení přechodové křivky s poloměrem R ; (c) čištění otvorů kartáčem a vyfukovacím čerpadlem; (d) vstřikování pojiva do otvorů; (e) nanesení pojiva na povrch betonu; a (f) instalace výztuže pro zesílení železobetonových desek, , převzato z [27], Fig. 2., [28].

Desky byly postaveny na vrchol pece střední velikosti (viz Obrázek 28 a, b) a podrobeny stejnému ohybovému testu s čtyřbodovým zatížením, jaký se používá pro testy při běžné teplotě okolí (viz Obrázek 28 c). Pro simulaci tepelných podmínek reprezentujících deskové prvky byla pouze spodní strana desek vystavena požární křivce ISO 834, přičemž boční plochy desek byly chráněny keramickou vlnou, což simulovalo adiabatické teplotní hranice.



Obrázek 28 Uspořádání zkoušky požární odolnosti: (a) celkový pohled na zkoušky, (b) čelní pohled na zkoušenou desku s otevřenou pecí a (c) podélné schéma zkoušek. Rozměry v mm. , převzato z [27], Fig. 4.

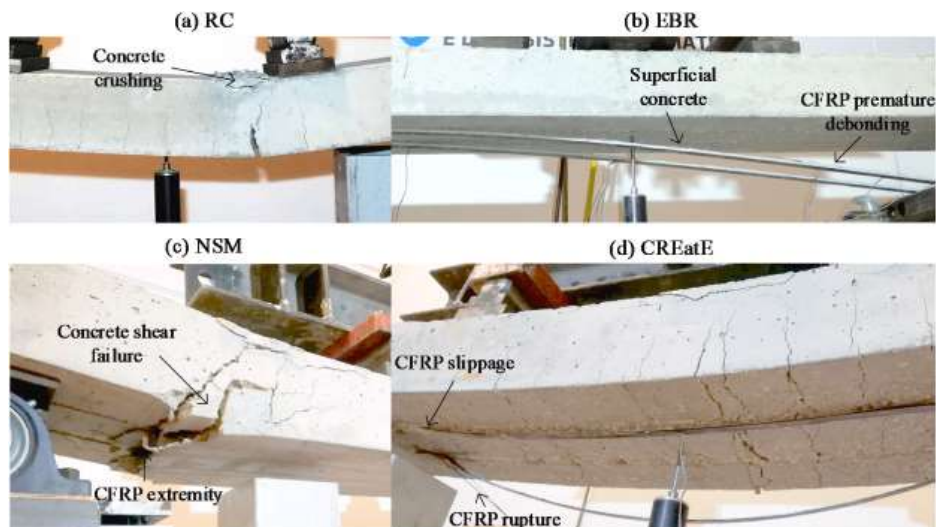
Teploty v konkrétních místech různých materiálů byly sledovány s využitím termočlánků typu K (o vnějším průměru 1 mm), jejichž názvy a umístění jsou znázorněny na obrázku 29. Ve střední části rozpětí všech testovaných desek byly termočlánky umístěny do betonu (T1, T2 a T4) a tahové oceli použité jako výztuž (T3); jeden termočlánek navíc byl umístěn v lepidle desek EBR a CREatE (T5); tři další termočlánky byly použity v deskách NSM, umístěných ve spodní části (T6) a horní části (T7) CFRP pásu a ve střední hloubce štěrbiny (T5). Teploty byly rovněž sledovány v kotevních zónách výztužných systémů: pro EBR byly termočlánky T8 až T13 umístěny v lepidle; pro NSM byly termočlánky T8 až T13 umístěny ve střední hloubce štěrbiny (také v lepidle); pro CREatE byly termočlánky T8 až T13 umístěny v lepidle uvnitř kotevních otvorů. Střední průhyby byly monitorovány pomocí dvou elektrických snímačů umístěných v horní části desek.



Obrázek 29 Umístění termočlánků (červená) a snímačů posunu (modrá) v sekcích středního rozpětí a v kotevních zónách pásů CFRP pro vyztužené desky (a) EBR (b) NSM a (c) CREAtE; všechny rozměry v mm, převzato z [27], Fig. 5.

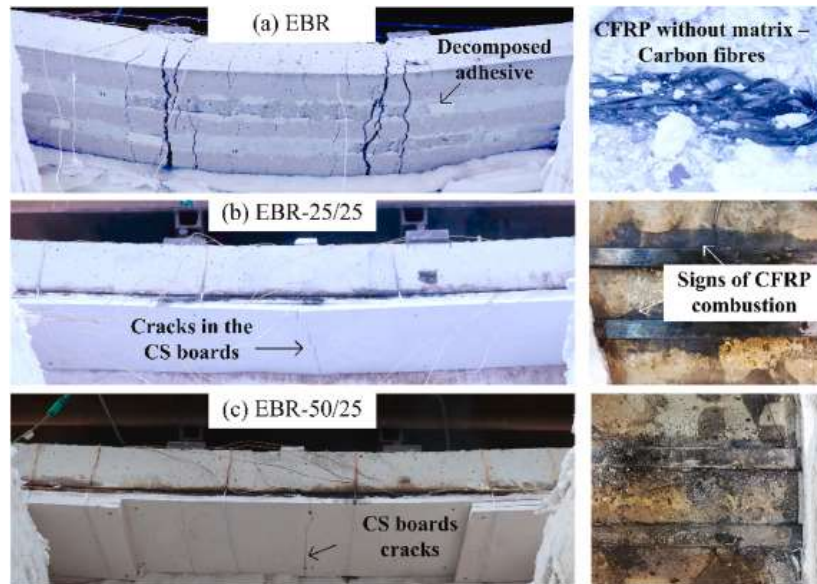
7.5.2 Výsledky zkoušek

Obrázek 30 ukazuje různé způsoby porušení testovaných desek při pokojové okolní teplotě. Podle očekávání selhala nevyztužená deska v důsledku drcení betonu po dosažení tuhosti oceli. Zhroucení desky EBR nastalo po náhlém odlepení systému CFRP na rozhraní beton-adhezivního materiálu před dosažením tuhosti oceli. Deska NSM byla porušena smykem betonu v blízkosti podpory a vedle kotvení z CFRP. Tento způsob křehkého porušení byl důsledkem vysokého nárůstu pevnosti v ohybu poskytované technikou NSM, v kombinaci s nižší pevností betonu, než bylo předpokládáno při návrhu desky. Deska CREAtE selhala v důsledku ohybu, kde došlo ke kombinaci skluzu jednoho z pásů CFRP a tahového porušení druhého pásu CFRP.



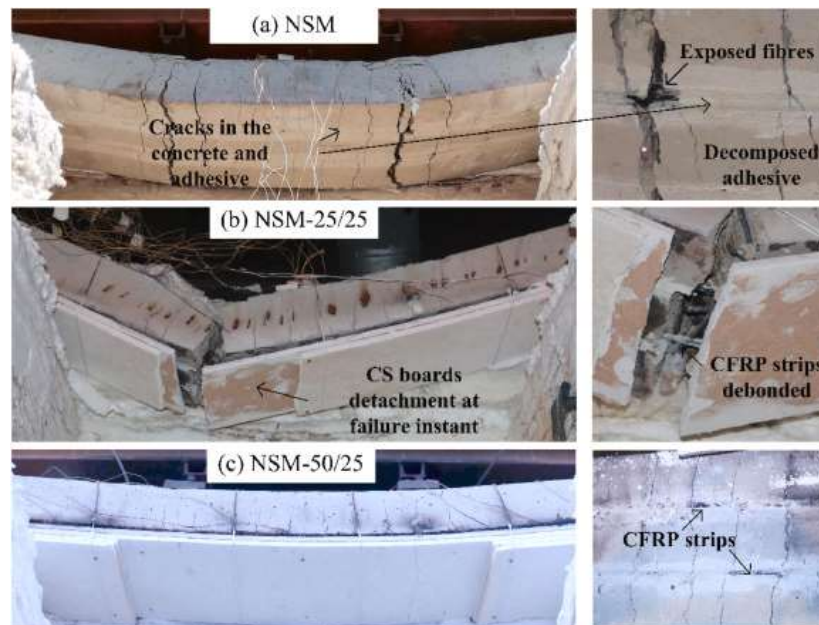
Obrázek 30 Režimy selhání desek při zkoušení při teplotě okolí: (a) železobeton, (b) EBR, (c) NSM a (d) CREAtE, převzato z [27], Fig. 7.

Obrázek 31 ukazuje celkový pohled na desky zpevněné EBR po provedených zkouškách požární odolnosti. Jak bylo předpokládáno, v nechráněné desce vykazovalo jak spojovací lepidlo, tak pásy CFRP známky rozsáhlého tepelného rozkladu.



Obrázek 31 Pozorování desek po požáru zesílené technikou EBR, převzato z [27], Fig. 10.

Obrázek 32 ukazuje všechny desky NSM po provedených zkouškách. Na nechráněné desce, znázorněné na obrázku 32 (a), lze pozorovat, že spojovací lepidlo vykazovalo známky rozsáhlého tepelného rozkladu, což naznačuje vážný vliv na jeho schopnost přenosu spojení. Také jsou patrné trhliny podél délky této desky, které se nejspíše vytvořily po rozpojení CFRP. V některých z těchto trhlin bylo též možné identifikovat prasklá uhlíková vlákna. Technika zpevňování NSM ztratila svou strukturální účinnost kvůli porušení vazby CFRP a betonu (prokluzování) a ne kvůli prasknutí CFRP pásů tahem.



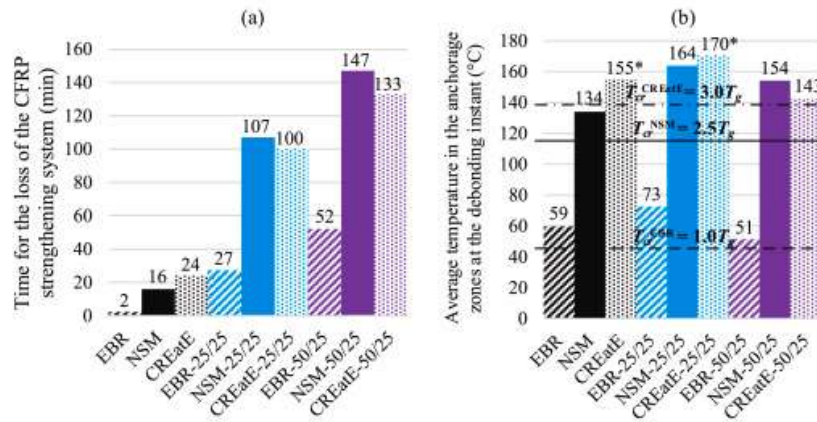
Obrázek 32 Pozorování desek po požáru zesílené technikou NSM, převzato z [27], Fig. 11.

Obrázek 33 ukazuje, že v nechráněné desce CREatE došlo ke kompletní degradaci matrice CFRP pásů. Skutečně dosáhla teplot přesahujících 600 °C, což je výrazně nad jejich termickou degradací (T_d). Navzdory účinnosti tepelné izolace poskytované betonem, který obklopoval tuto kotvení, došlo k prokluzu CFRP pásů v zónách ukotvení, což vedlo k ztrátě strukturální účinnosti výztužného systému.



Obrázek 33 Pozorování desek po požáru zesílené technikou CREatE, převzato z [27], Fig. 12.

Graf na obrázku 34 prezentuje požární odolnost zpevňovacích technik a minimální průměrnou teplotu v kotevních zónách při rozpojení CFRP u všech testovaných desek.



Obrázek 34 (a) Požární odolnost zpevňovacích technik a (b) minimální průměrná teplota v kotevních zónách při rozpojení CFRP – „Kritické“ teploty definované přerušovanou čarou pro EBR, plnou čarou pro NSM a tečkovanou čarou pro CREatE posilovací techniku. *Hodnoty odpovídající T9 (levé ukotvení) nebo T12 (pravé ukotvení), protože v těchto deskách byly ztraceny některé hodnoty zbývajících kotevních termočlánků (T8, T10, T11 a T13), převzato z [27], Fig. 15.

Získané výsledky naznačují následující:

Bez ochrany prokázala technika CREatE vyšší odolnost vůči požáru ve srovnání s alternativními technikami NSM a EBR (24 minut versus 16 minut a 2 minuty); S požární ochranou, bez ohledu na geometrii, prokázaly techniky NSM a CREatE podobnou odolnost vůči požáru (oba přes 120 minut), což je vyšší než u techniky EBR (méně než 60 minut); a "kritické" teploty pro každou techniku byly stanoveny na 1,0 Tg, 2,5 Tg a 3,0 Tg pro EBR, NSM a CREatE, přičemž Tg představuje teplotu skelného přechodu lepidla, definovanou na základě počátku poklesu křivky skladovacího modulu z dynamické mechanické analýzy.

7.5.3 Závěr experimentu

Závěr experimentu se dá popsat následujícími body:

- Testy ohybu při okolní teplotě potvrdily vynikající výkon inovativní techniky CREatE ve srovnání s alternativami EBR a NSM, to bylo přisouzeno inovativnímu lepenému ukotvení použitému pro oba konce pásů CFRP.
- Testy požární odolnosti zdůraznily náchylnost zpevňovacích systémů CFRP, když byly vystaveny požáru bez ochrany: v nechráněných deskách ztratily systémy CFRP účinnost po 2, 16 a 24 minutách expozice požáru, v pořadí pro EBR, NSM a CREatE techniky.
- S konstantní tloušťkou 25 mm tepelné izolace podél lepené délky bylo možné výrazně prodloužit strukturální účinnost zpevňujících systémů CFRP, zejména u technik NSM a CREatE, kde zůstaly pásy CFRP účinné po více než 90 minut působení požáru; u techniky EBR byla tato doba kratší než 30 minut.
- S dodatečnou tepelnou izolací v oblastech kotvení bylo dosaženo dalšího prodloužení strukturální účinnosti systémů CFRP – u technik NSM a CREatE zůstaly pásy CFRP účinné po dobu více než 120 minut působení požáru, zatímco u EBR byla tato doba o něco kratší než 60 minut.
- Zachování pevnosti vazby v oblastech kotvení bylo výrazně zlepšeno dodatečnou tepelnou izolací, zejména u technik EBR a NSM – technika CREatE již těží z protipožární ochrany poskytované okolním betonem.
- Celkově experimentální data potvrzují výrazně lepší požární vlastnosti systémů CFRP instalovaných podle techniky NSM ve srovnání s EBR. Získané výsledky také ukazují, že techniky CREatE a NSM vykazují podobný požární výkon a mnohem lepší než EBR.

7.6 Příklady dalších experimentů

Byly provedeny i další studie na téma požární odolnosti nosníků nebo desek dodatečně vyztužených kompozitními lamely. Výsledky všech studií jsou podobné nebo se alespoň k sobě velice přibližují svými závěry. Mezi další současné provedené experimenty můžeme zařadit následující: požární odolnost železobetonových nosníků zesílených CFRP při různých úrovních zatížení [29], experimentální výzkum požární odolnosti izolovaných betonových nosníků vyztužených výztuží z FRP prutů připevněných na povrchu [30], chování železobetonových deskových pásů zpevněných předpjatými lamináty NSM-CFRP při požáru [31], požární odolnost železobetonových nosníků zesílených CFRP při různých úrovních zatížení [32], chování a pevnost v ohybu ohněm poškozených vysokopevnostních vyztužených obdélníkových betonových nosníků po zpevnění CFRP lamináty [33] a chování a pevnost v ohybu požárem poškozených vysokopevnostních vyztužených pravoúhlých betonových nosníků s tahovými nebo tlakovými zónami vystavenými ohni opravených CFRP deskami [34]. U uvedených studií se jedná o podobné experimenty, se kterými jsem se již seznámil.

8 Praktická část

Hlavním úkolem praktické části byla příprava na požární experiment. Především příprava tvorby betonových vzorků a příprava na provedení požární zkoušky, která proběhla v prostorách Fakulty stavební ČVUT. Diplomová práce je zaměřena na výzkum a testování uhlíkových lamel bez zvýšené protipožární odolnosti. Je to jeden z prvních kroků před zkouškami, kde se budou testovat lamely se zvýšenou požární odolností.

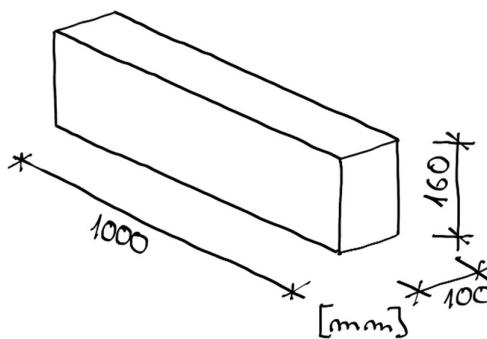
Uhlíkové lamely se testovaly zpočátku za standardních podmínek, pro zjištění výstupů za normální teploty viz diplomová práce [35]. Po zjištění maximální zatěžovací síly na nosník byly testovány za podmínek zvýšených teplot. Kde se předpokládala kratší doba požární odolnosti uhlíkových lamel. Uhlíkové lamely nebyly při experimentech dodatečně chráněny proti účinkům vyšších teplot např. obklady nebo nástřiky. Zkoušel se tak nosník zesílený nechráněnou uhlíkovou lamelou.

9 Příprava na zkoušku požární odolnosti

V této části si přesněji popíšeme a určíme zvolené zkušební prvky, materiály a přístroje, které bylo potřeba použít pro provedení zkoušky požární odolnosti.

9.1 Nosníky

Pro přípravu požární zkoušky se připravily vzorky nosníků o rozměrech 100 x 160 mm délky 1000 mm (viz Obrázek 35). Na spodní stranu tří nosníků se aplikovala pomocí nalepení uhlíková lamela. Uhlíková lamela byla připevněná pomocí pryskyřic, od výrobce SIKA. Objem betonu pro tvorbu nosníků je 48 litrů (viz tabulka 1).

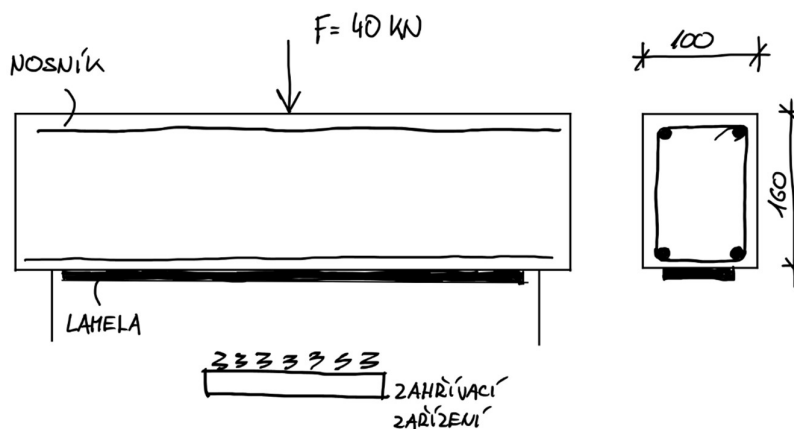


Obrázek 35 Skica nosníku

Tabulka 1 Celkový objem těles

Rozměry zkušebního prvku [mm]			Objem prvku [m ³]	Počet těles [ks]	Celkový objem prvků [m ³]
š	v	d			
100	160	1000	0,016	3	0,048
Celkem objem zkušebních těles					0,048 (48 litrů)

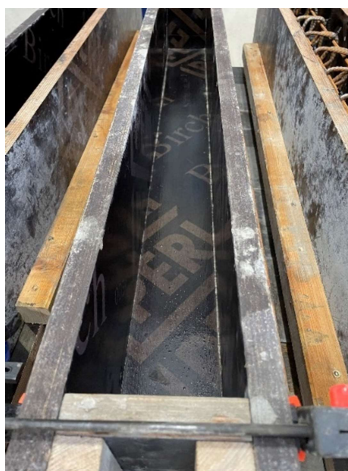
Nosník bude při zkoušce zatěžován uprostřed nosníku předpokládanou silou 40 kN (viz obrázek 36).



Obrázek 36 Skica zatížení nosníku

9.2 Bednění

Pro vybetonování trámů bylo vytvořeno bednění (viz obrázek 37 a 38). Z bednění se zhotovily trámy rozměrů 100x160x1000 mm. Sestaveny jsou tak, aby se při betonáži lehce dostaly nosníky ven. Na obrázku 38 může vidět navržené krytí třmínků které bylo 15 mm a pro hlavní nosnou výztuž bylo navrženo krytí 21 mm.



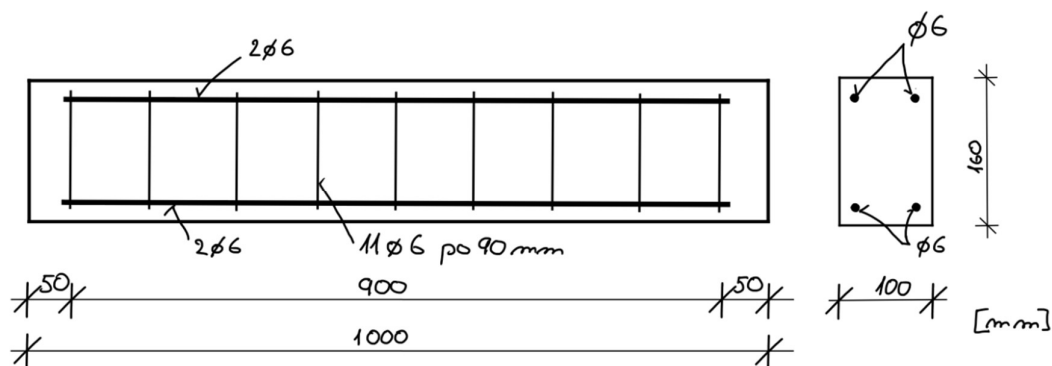
Obrázek 37 Složené bednění připravené na betonáž



Obrázek 38 Rozměr bednění

9.3 Výztuž

Výztuž do trámu je navržena s označením B500B. Navržena je dle ČSN EN 1992-1-1 [36]. Zbylá výztuž byla navržena dle konstrukčních zásad. Třmínky jsou průměru 6 mm. Na jeden trám je připraveno 11 třmínků. Třmínky jsou od sebe vzdáleny v ose 90 mm (viz obrázek 40). Horní i dolní nosná výztuž trámu je navržena z betonářské výztuže průměru 6 mm. Pro jeden trám je potřeba čtyř prutů průměru 6 mm. Délka jednoho prutu je 1120 mm. Schéma výztuže je na obrázku 39. Výkaz veškeré použité výztuže je vypsán v tabulce 2.



Obrázek 39 Schéma vyztužení železobetonového trámu

Tabulka 2 Výkaz výztuže včetně tvaru prutů

Pol.	Ks	Ø [m]	Jednotl. délka [m]	Tvar prutu s popisem (bez měřítka)	Celková délka [m]	Hmotnost [kg]
1	11	6	0,48		5,28	1,17
2	4	6	1,12		4,48	0,99
Celková hmotnost [kg]						2,16



Obrázek 40 Vzdálenost třmínků na osu cca 90mm

9.4 Betonová směs

Betonová směs pro výrobu trámu byla navržena, tak aby co nejvíce napodobovala betony z šedesátých let. Jedná se o snahu co nejlépe přiblížit experiment reálnému použití v praxi. Předpoklad je, že se lamely budou používat na věkově starších konstrukcích.

Složení betonové směsi (viz obrázek 41) pro výrobu jedné série tří trámu je následující. Jako pojivo byl zvolen Cement CEM II – 32,5 R ("strusko-portlandský"). Kamenivo je navrženo ve frakci 8 až 16 mm (viz obrázek 42). Plus písek ve frakci 0 až 4 mm (viz obrázek 43). Ke všemu je přidána voda.

Pro jednu sadu tří betonových trámu a tří betonových kostech byla spočtena navážka v gramech s hmotnostními poměry u jednotlivých přísad následovně v tabulce 3.

Tabulka 3 Hmotnostní poměr betonové směsi s hmotností v gramech

Složení betonové směsi	Poměr	Hmotnost (g)
Cement CEM II -32,5 R	1	18 900
Voda	0,6	11 340
Kamenivo 8/16	3,6	68 040
Písky 0-4 mm	2,8	52 920
Celkem	8	151 200

Předpokládaná hustota betonové směsi je 2400 kg/m³.

S těmito parametry se nejlépe přibližujeme k betonům z šedesátých let. Beton s označením C25/30 a s ideálně průměrnou tlakovou pevností na válci 33 MPa.



Obrázek 41 Hotová namíchaná betonová směs na betonáž



Obrázek 42 Kamenivo frakce 8–16 mm



Obrázek 43 Písek frakce 0–4 mm

9.5 Lamely

Pro zkoušku požární odolnosti nosníků vyztužených lamelou byly vybrány lamely od společnosti SIKA ze systému CARBODUR (viz obrázek 44). Přesné označení Sika CarboDur S 512 – bm. Použity byly lamely z tažených uhlíkových vláken pro zesilování konstrukcí. Sika CarboDur S jsou lamely z tažených uhlíkových vláken (CFRC) vyztužených polymery, určené pro zesilování betonových, dřevěných, zděných, ocelových a vláknem vyztužených konstrukcí. Rozměry zvolené lamely pro šířku je 50 mm a pro tloušťku 1,2 mm. Plocha příčného řezu je 60 mm². Lamely budou aplikovány na spodní stranu trámu. Vzhled lamely jsou uhlíková vlákna vyztužená polymerem s epoxidovou matricí a barva tedy černá. Vlastnosti lamely jsou uvedeny v tabulce 4. [37]



Obrázek 44 CFRP lamela aplikovaná na nosník

Tabulka 4 Vlastnosti lamely CFRC typ Sika CarboDur S 512 – bm [37]

Objemová hmotnost	1600 kg/m ³
Porovnání rozměrů pro stejný účinek	50x1,2 mm
Porovnání hmotnosti pro stejný účinek	96 g/bm
Zachycení sil	Jen v podélném směru
Délka	860 mm
Pevnost v tahu	2900 MPa
Modul pružnosti v tahu	165 000 MPa
Stavební výška	Minimální
Odolnost proti únavě	vysoká
Max. povolená teplota	+80 °C

9.6 Lepidlo

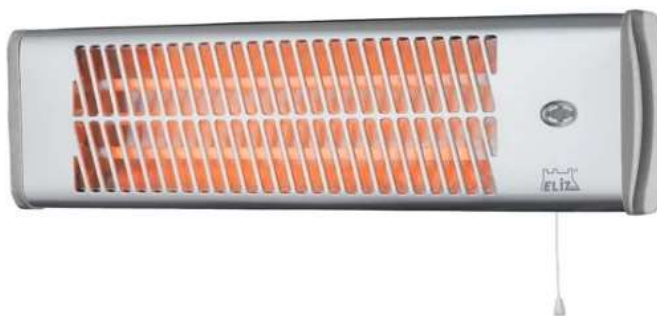
K nalepení lamely k trámu nám posloužilo lepidlo od firmy SIKA. Jedná se o lepidlo pro lepení externí výztuže. Přesné označení lepidla je Sikadur-30 C935 – 6kg. Jedná se o 2komponentní tixotropní lepící hmotu, na bázi kombinace epoxidových pryskyřic a speciálních plniv, navrženo pro aplikaci za normálních teplot +8 °C až +35 °C. Poměr míchání je 3:1. Provozní teplota je udávána mezi –40 °C až +45 °C (vytvrzování při +23 °C). Teplota skelného přechodu je dle výrobce stanovena na +52 °C. Stanovená reakce na oheň je dle eurotřídy C–s1, d0. [38]

Postup míchání lepidla [38]:

- Komponent A (pryskyřice) míchejte po dobu ~ 30 sekund.
- Přidejte komponent B (tužidlo) do komponentu A.
- Komponenty A+B nepřetržitě míchejte po dobu - 3 minut, dokud nedosáhnete rovnoměrně hladké, barevné směsi.
- Pro zajištění důkladného promíchání přelijte materiály do jiné čisté nádoby a znovu promíchejte, abyste dosáhli hladké a rovnoměrné směsi.

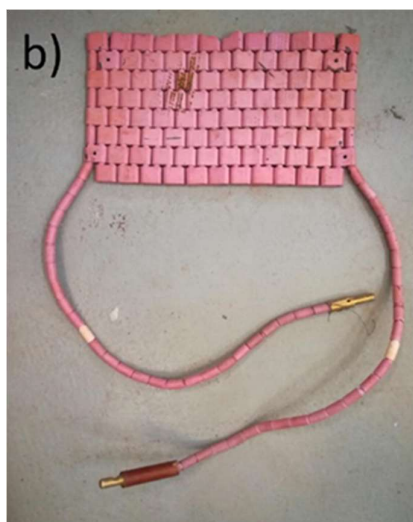
9.7 Zahřívací zařízení

Pro zahřívání bylo zvoleno zařízení zvané infrazářič (viz obrázek 45). Toto sálavé zařízení je schopno výkonu až 1500 W. K topení využívá křemíkové trubice, které ohřívají objekty před sebou. Konstrukce těla je kovová a obsahuje ochranu proti přehřátí. Rozměry sálavého zařízení jsou 15x11x54,5 cm. Sálavé zařízení by mělo dostatečně napodobit vznik požáru. Výhodou tohoto zařízení je možnost dosažení požadovaných teplot (cca 300 °C), velikost plochy ohřevu a její stejná opakovatelnost v dalších požárních zkouškách. Nevýhodou je, že ze sálavého zařízení se nedozvíme přesné hodnoty teplot. Proto teplota působící na nosník byla vždy v průběhu celé zkoušky zaznamenávána pomocí termočlánků. [39]

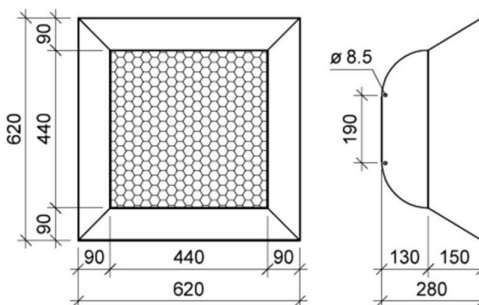


Obrázek 45 Zahřívací zařízení [39]

Další z možností k zahřívání nosníku a lamely byly zváženy k použití keramické články (viz obrázek 46) nebo sálavý plynový hořák KASPO K30-STL (viz obrázek 47). Ani jedno z těchto zařízení nebylo přijato například z důvodů příliš rychlého nárůstu vysokých teplot nebo plochy působení nebo způsobu zapojení na provozuschopnost.



Obrázek 46 Keramické dečky [40]



Obrázek 47 Sálavý plynový hořák (Světelný zářič) [41]

9.8 Způsob měření teplot: Termočlánky

Pro měření teploty za vysokých teplot posloužily teplotní termočlánky. Pomocí termočlánků budeme zaznamenávat teplotu. Zvoleny jsou kabelové termoelektrické snímače teploty s označením MTC 12 od společnosti MAVIS (viz obrázek 50). Řada MTC 12 je základním provedením kabelového snímače teploty. Termočlánek typu „K“, třída přenosu 2 dle ČSN EN 60584-1 ed. 2 [42] - provedení kabelu GLGL wrap 2 x 0,5 mm, drát. Instalovány jsou do betonových trámů při betonáži.

Norma ČSN EN 1363-1 rozlišuje termoelektrické články, které používáme k měření teploty jsou to:

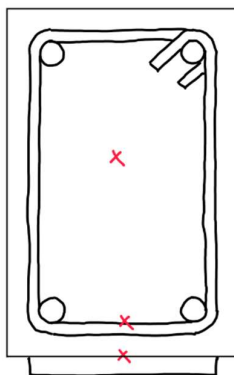
- Termoelektrické články v peci – deskové snímače teploty
- Termoelektrické články na neohřívaném povrchu
- Mobilní termoelektrické články
- Termoelektrické články pro teplotu okolí – plášťové termočlánky
- Vnitřní termoelektrické články

Vnitřní termoelektrické články budou použity při experimentu a jsou vhodné k použití a k zabetonování do nosníku.

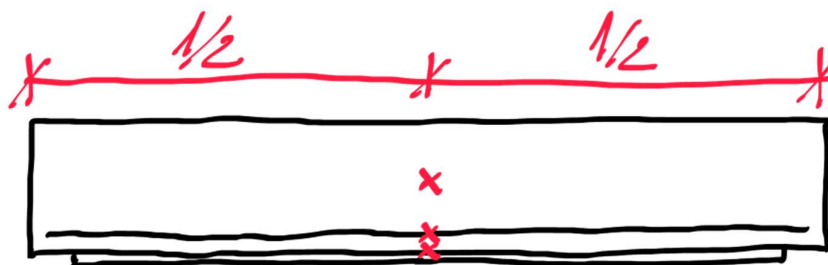
Popis a funkce termočlánků lze nalézt například v [43][44].

9.8.1 Umístění termočlánku

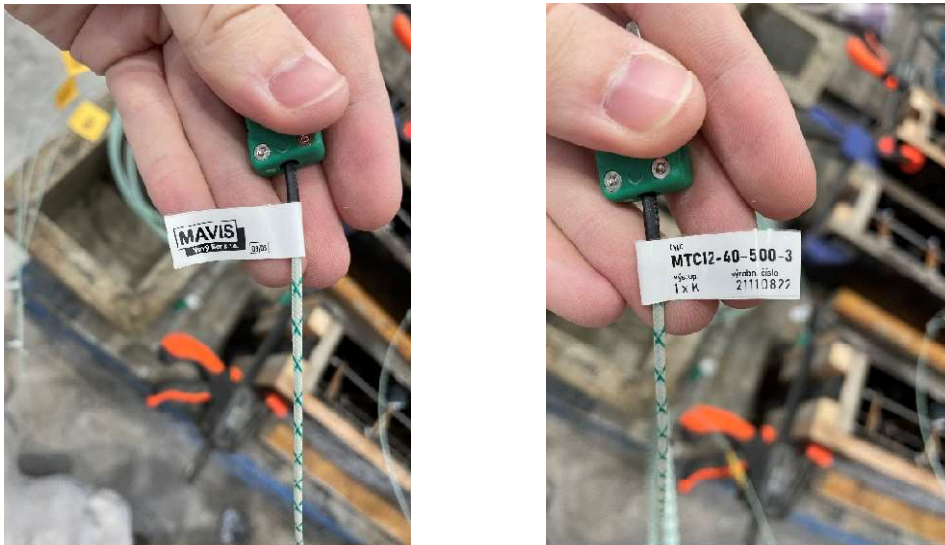
Umístění termočlánku se při betonáži navrhlo ve třech bodech. První umístění termočlánku se nacházelo uprostřed nosníku mezi lamelou a trámem. Druhý na spodní straně výztuže a třetí ve středu trámu (viz obrázek 48). Všechny tři termočlánky byly navrženy uprostřed nosníku (viz obrázek 49), kde se předpokládala oblast největšího namáhání.



Obrázek 48 Skica řezu nosníku s vyznačením umístění termočlánků



Obrázek 49 Skica podélného řezu nosníkem s vyznačením umístění termočlánků



Obrázek 50 Foto označení použitých termočláneků

Při dodatečném vyztužení nosníku lamelou se při lepení lamely na nosník umístil čtvrtý termočlánek do vrstvy lepidla pro co nejpřesnější záznam teplot lepidla. Umístění termočlánek bylo uprostřed rozpětí nosníku. Na obrázku 51 můžeme vidět jak se z prostoru mezi lamelou a nosníkem vysouvá termočlánek ven.

Před začátkem každé zkoušky byl na nosník upevněn poslední termočlánek. Umístění termočlánek je vidět na obrázku 51. Umístění termočlánek bylo v polovině délky na středu nosníku. Termočlánek se nacházel v prostoru pod lamelou, pro měření aktuální teploty působící na povrch lamely. Připevněn byl na nosník pomocí drátů omotaných okolo nosníku.



Obrázek 51 Termočlánek připevněný pod lamelou

9.9 Hydraulický lis

K vytvoření zatížení působící na trám byl vybrán hydraulický lis (viz obrázek 52). Hydraulický lis vyvine sílu až 100 kN. Přesné označení je LIS FP100. Pomocí spojení s počítačem se dá nastavit přesné zatížení a zachování velikosti působící síly na nosník v průběhu celé zkoušky.



Obrázek 52 Hydraulický lis FP100

10 Výroba zkušebních prvků

V této kapitole se dočteme, jak probíhala výroba zkušebních prvků v našem případě výroba tří železobetonových nosníků s dodatečným zesílením pomocí lamel z uhlíkových vláken.

10.1 Výroba nosníků

Z předchozích kapitol jsem se dozvěděli o všech použitých materiálech a produktech k vytvoření nosníků. Nosníky jsou betonovány po třech za jednu betonáž. Postup výroby je následující. Pro tvorbu nosníků bylo vytvořeno bednění s vnitřními rozměry pro jeden nosník 100x160x1000 mm. Bednění je vidět na obrázku 53. Před začátkem betonování se bednění namaže, aby se nosník dostal posléze z bednění ven.

Prvně se k sobě spojily třmínky a nosná výztuž. Tím nám vznikl armovací koš, který se uložil do bednění (viz obrázek 54). Při ukotvování armovacího koše do bednění se umístily na místo také termočlánky (viz obrázek 55).

Po uložení výztuže a ukotvení termočlánků do bednění na určené místo se nalil do bednění připravený beton. Aby se beton dostal do všech míst okolo výztuže, byl trám uložen na vibrační stůl. Pomocí vibračního stolu se beton dostatečně rozlezl do všech míst

v bedně. Na obrázku 56 můžeme vidět konečné zalití bedně betonem. Po zabetonování celého bedně byly trámy přikryty folií (viz obrázek 57), aby beton nepopraskal. Takto byly trámy 5 dní ponechány v bedně. Po uplynutí 5 dní byly trámy vyjmuty z bedně a dány stranou kde minimálně 28 dní nabývaly pevnosti (viz obrázek 58). Po uplynutí této doby jsou trámy připraveny k instalování lamel na spodní povrch nosníku.



Obrázek 53 Bedně



Obrázek 54 Uložení výztuže do bedně



Obrázek 55 Připevnění termočlánků do bedně



Obrázek 56 Konečné zalití bednění betonem



Obrázek 57 Přikrytí čerstvého betonu folií



Obrázek 58 Finální trámy po 28 dnech

10.2 Dodatečné zesílení nosníku

K dodatečnému zesílení nosníku bylo potřeba připravit dvě hlavní věci. Jednou je lepidlo a druhou uhlíková lamela.

10.2.1 Lepidlo

Pro aplikaci uhlíkové lamely na povrch betonu se používá speciální lepidlo, nejčastěji dvousložkové epoxydové pryskyřice. V našem případě jsme použili lepidlo Sikadur-30 C935 – 6kg.

10.2.2 Uhlíková lamela

Zvolená uhlíková lamela CFRC typ Sika CarboDur S 512 – bm má rozměry průřezu 50x1,2 mm. Délka lamely byla naměřena na 860 mm, aby nedocházelo ke kolizi s podporami.

10.2.3 Postup lepení uhlíkové lamely na nosník

- Nařezání lamely – naměření a označení na potřebnou délku.
- Příprava podkladu – obroušení podkladu na který se bude aplikovat lepidlo.
- Namíchání lepidla – jedná se o přípravu dvousložkové epoxydové pryskyřice.
- Nanesení lepidla – nanášení se provádí v předepsaných tloušťkách, jak na nosník, kde byl připraven podklad, tak na samostatnou lamelu. Lepidlo se nanáší na nepopsanou stranu lamely, z důvodu pozdějšího možného identifikování.
- Aplikace lamely na nosík – lamela je pomocí válečku přitlačena k nosníku a je vyvíjen tlak, aby se lepidlo rovnoměrně rozlezlo mezi lamelou a nosníkem.
- Konečná práce – konečný prvek (nosník) se dal stranou a nechal bez dalších manipulací zatvrdnout (viz obrázek 59 a 60).



Obrázek 59 Lamela nalepená na nosníku



Obrázek 60 Dva dodatečně zesílené nosníky

11 Laboratorní zkoušky pro zjištění mechanických vlastností betonu

Před zahájením požárních zkoušek byly změřeny rozměry všech nosníků, a následně byla tělesa zvážena. Na základě těchto údajů byla následně vypočtena objemová hmotnost:

$$\rho = m/V \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

m = hmotnost tělesa

V = objem tělesa

Vyhodnocení objemových hmotností je v tabulce 5.

Tabulka 5 Objemová hmotnost zkušebních prvků

Prvek	Rozměry			Hmotnost	Objemová hmotnost
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]	ρ [kg/m ³]
P1	149,4	147,3	149,5	7,605	2312
P2	149,2	152,7	149,0	7,715	2272
P3	149,0	152,5	149,0	7,740	2287
T7	-	-	-	-	-
T8	102,11	166,18	1000	40,83	2406
T9	100,67	164,2	1000	39,80	2408

11.1 Pevnost betonu v tlaku

Pevnosti v tlaku byly měřeny dle [45][46] na 3 krychlích s hranou o délce 150 mm. Tato tělesa byla pečlivě umístěna do laboratorního lisu, přičemž byla centrována mezi tlačnými deskami. Postupně byla zatěžována rostoucím tlakem až do dosažení bodu porušení. Výsledky zkoušky a jejich vyhodnocení jsou prezentovány v tabulce č. 6.

Tabulka 6 Stanovení síly a pevnosti v tlaku

Prvek	Rozměry			Hmotnost	Objemová hmotnost		Síla	Pevnost	
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]	ρ [kg/m ³]		F [kN]	$f_{c,cube}$ [MPa]	
P1	149,4	147,3	149,5	7,605	2312	2290	610,68	27,7	24,5
P2	149,2	152,7	149,0	7,715	2272		501,77	22,0	
P3	149,0	152,5	149,0	7,740	2287		543,82	23,9	

12 Experimentální analýza

Obsahem této kapitoly je popis prostoru k provedení zkoušky. Co bylo potřeba před každou zkouškou na začátku připravit, aby mohla začít zkouška požární odolnosti a jak probíhaly zkoušky jednotlivých nosníků.

12.1 Příprava prostoru zkoušky

Požární zkouška se prováděla v areálu školy na Fakultě stavební ČVUT. Prostor experimentu je vidět na obrázku 61. Nachází se zde místo pro získávání dat skrze počítač. Počítač v našem případě notebook je na obrázku 62, kde je vidět začínající zápis dat ze zkoušky. Počítač je propojený s dataloggerem, který sbírá data ze všech termočlánků a posílá data do počítače. Datalogger je na obrázku 63 se zapojenými termočlánky. Díky tomuto propojení dostáváme zápis teplot z termočlánků v průběhu celé zkoušky.

Další místo se dá popsat jako náhražka malé pece v prostoru mechanického lisu (viz obrázek 64,65 a 66). A naproti němu propojený počítač s mechanickým lisem na ovládání velikosti zatížení působící na zesílený nosník v lisu.



Obrázek 61 Místo provedení požární zkoušky



Obrázek 62 Notebook zaznamenávající data teplot v čase



Obrázek 63 Datalogger propojený s termočlánky

Testovaným vzorkem byl nosník umístěný v mechanickém lisu. Umístění nosníku v lisu je vidět a obrázku 64. Zkouška simulovala zatížený nosník za působení zvýšených teplot na spodní stranu nosníku. Zahřívání nám vytvářelo sálavé zařízení pomocí působení zvýšené teploty na nosník. Sálavé zařízení bylo umístěno pod nosníkem, aby působilo ve středu rozpětí, jak je vidět na obrázku 65.



Obrázek 64 Nosník připravený ke zkoušce



Obrázek 65 Sálavé zařízení působící na nosník

Okolo zkušebního místa (prostor mezi zahřívacím zařízením a lisem) se na dvou stranách připevnila izolace z minerální vaty. Ta napomáhá zabránění ohřevu hydraulického lisu a snižuje výkyvy teplot v okolí zkušebního prvku. Pokud by zde nebyla mohlo by například docházet k proudění vzduchu a tím by se mohla měnit či kolísat teplota působící na zkušební vzorek nebo by zvýšená teplota mohla poškodit hydraulický lis. Umístění minerální vaty je na obrázku 66.



Obrázek 66 Ochrana lisu před účinky zvýšených teplot

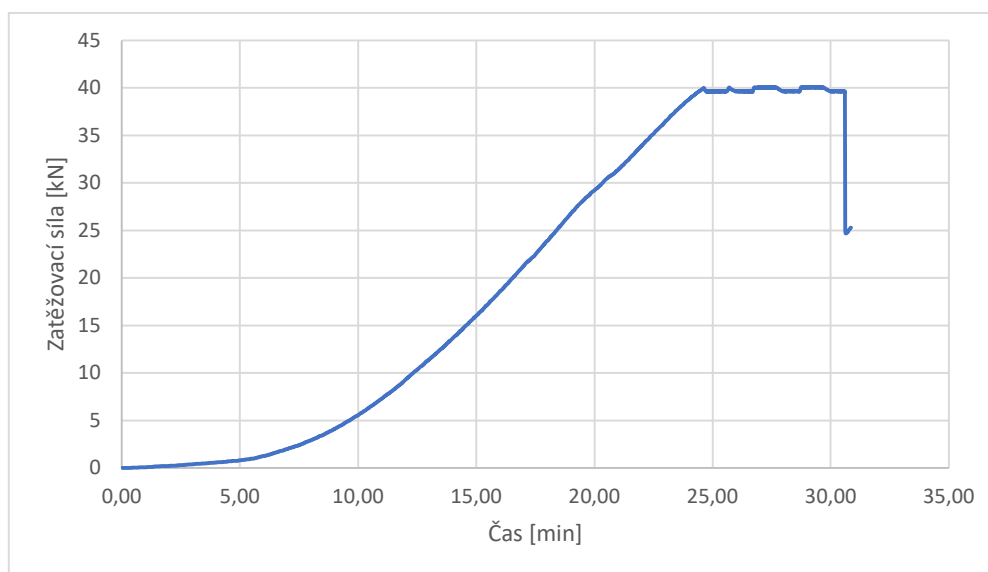
12.2 Průběh zatěžování

Na začátku byly nejprve připraveny podpory na hydraulickém lisu. Na podpory pak byl umístěn testovaný nosník. Dále byly zapojeny všechny termočlánky do dataloggeru. Po zapojení termočlánků se na nosník spustila paže hydraulického lisu. Síla z lisu byla vedena do jedné silové složky, ze které byl realizován dvoubodový ohyb.

Po spuštění lisu byl nastaven postupný posun až k testovanému nosníku na nulové silové zatížení, až do doteku trámu s paží hydraulického lisu. Po dosažení kontaktu lisu s nosníkem začal lis působit na nosník silou zaznamenanou v grafu 1. Na grafu můžeme vidět postupný nárůst až do 40 kN. Na úrovni 40 kN se lis dále snažil držet stálou velikost síly působící na nosník. Při dosažení síly 40 kN bylo pod nosník přiloženo zahřívací zařízení. Jako zahřívací zařízení bylo použito zmíněné sálavé zařízení. Po chvíli ustálení (2 min) neměnného zatížení na nosník se zapnulo sálavé zařízení. Od zapnutí sálavého zařízení jsou vyhodnocovány výsledky zkoušky požární odolnosti.

Tento postup byl aplikován u všech třech zkoušek na začátku každé z nich, popsat by se dal zkráceně těmito třemi body:

- Spuštění lisu a nastavení ramena na kontakt s nosníkem
- Začátek zatěžování posun po 0,03 mm až do dosažení síly 40 kN
- Udržování konstantní působící síly na nosník



Graf 1 Znárodnění zatěžování nosníku silou (od 40 kN se síla ustálila konstantně)

12.3 Průběh zahřívání

Záznam teplot v čase ze zkoušky začíná v momentě, kdy bylo zpuštěno sálavé zařízení. Začátek zahřívání byl spuštěn po dvou minutách po dosažení zatěžovací síly 40 kN. Konec zkoušky byl určen kolapsem nosníku. U všech nosníků došlo ke kolapsu. V průběhu zkoušky se zaznamenávala teplota ze všech termočlánků.

12.3.1 Průběh zahřívání nosníku T7

Zkouška požární odolnosti zesíleného nosníku byla provedena dne 2.12.2023, tedy 40 dní po jeho vybetonování, po vyžrání hotového betonu. Před začátkem zkoušky požární odolnosti bylo provedeno zatížení na nosník. Postupným zatěžováním až do 40 kN.

Zkouška požární odolnosti začala v 10:05 a trvala až do porušení trámu. Ke kolapsu došlo v 10:17. Z toho nám vyplývá, že nosník vydržel odolávat zvýšeným teplotám 12 minut.

Zvýšená teplota působící na lepidlo zapříčinila, že došlo k odpojení lamely od nosníku. Ve středové části došlo ke skelnému přechodu lepidla a odpojení lepidla od lamely. V pravé straně nosníku došlo k odtržení lepidla od nosníku T7. Při odtržení lamely od nosníku došlo k vzniku šikmé smykové trhliny a porušení nosníku. Na nosníku můžeme pozorovat menší smykové trhliny viz obrázek 68, kde jsou vyznačeny barevně.



Obrázek 67 Nosník T7 po zkoušce s vykreslením trhlin



Obrázek 68 Detail nosníku T7

12.3.2 Průběh zahřívání nosíku T8

Zkouška požární odolnosti zesíleného nosíku byla provedena dne 11.12.2023, tedy 49 dní po jeho vybetonování, po vyzrání hotového betonu. Před začátkem zkoušky požární odolnosti bylo provedeno zatížení na nosník. Postupným zatěžováním až do 40 kN.

Zkouška požární odolnosti začala v 10:05 a trvala až do porušení trámu. Ke kolapsu došlo v 10:10. Z toho nám vyplývá, že nosník vydržel odolávat zvýšeným teplotám 5 minut.

Zvýšená teplota působící na lepidlo pod lamelou zapříčinila sklený přechod lepidla. To způsobilo odpojení lamely od lepidla v prostřední části. Dále došlo k odtržení levé části lamely od povrchu nosíku, a to vedlo k celému kolapsu. Na obrázku 69 je vidět porušení nosíku na konci zkoušky ,kde došlo k vzniku smykové trhliny.



Obrázek 69 Porušení nosíku T8 po ukončení zkoušky

Na obrázku 70 můžeme vidět nosník s odtrženou lamou po ukončení zkoušky. Uprostřed nosníku je vidět zbylé lepidlo co se v průběhu zkoušky odlepilo od lamely a zůstalo přichycené na nosníku. Pravá část nosíku zůstala spojena s lamelou. Byla odtržena ručně až po skončení zkoušky, proto tu není ponecháno lepidlo. Na levé straně nosníku, kde došlo k trhlině, lamela zůstala přilepena k nosníku v prostoru mezi trhlinou až ke střední odlepené části. Na levé straně od trhliny byla lamela odtržena od nosníku. Poznámka se dá, že kotevní plocha lamely byla namáhána až do odtržení od nosníku, a to vedlo k náhlému kolapsu nosníku.



Obrázek 70 Nosník T8 s odtrženou lamelou, uprostřed lze vidět zbylé lepidlo co se odlepilo od lamely, pravá část je odtržena až po zkoušce ručně i zde lepidlo s lamelou zůstalo

Po ukončení zkoušky byla v prostoru trhliny odstraněna porušená část betonu a bylo zřetelně jasné že výztuž nebyla porušena (viz obrázek 12).



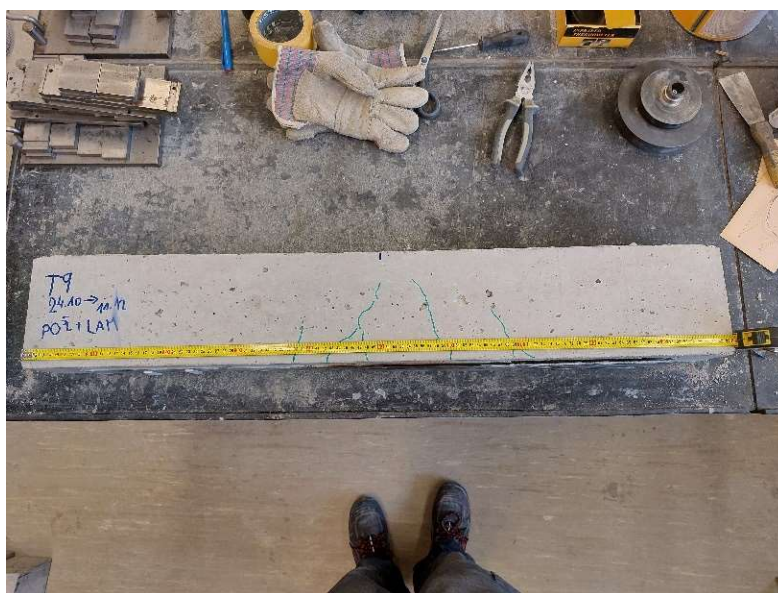
Obrázek 71 Pohled na neporušenou výztuž nosíku T8

12.3.3 Průběh zahřívání nosníku T9

Zkouška požární odolnosti zesíleného nosníku byla provedena dne 11.12.2023, tedy 49 dní po jeho vybetonování, po vyzrání hotového betonu. Před začátkem zkoušky požární odolnosti bylo provedeno zatížení na nosník. Postupným zatěžováním až do 40 kN.

Zkouška požární odolnosti začala ve 12:25 a trvala až do porušení trámu. Ke kolapsu došlo ve 12:40. Z toho nám vyplývá, že nosník vydržel odolávat zvýšeným teplotám 15 minut.

Zvýšená teplota působící na lepidlo zapříčinila, že došlo k odpojení lamely od nosníku. Ve středové části došlo ke skelnému přechodu lepidla a odpojení od lamely. V pravé straně nosníku došlo k odtržení lepidla od nosníku a dále vytvoření šikmé smykové trhliny. Na obrázku 72 je vidět vznik trhlin po požární zkoušce.



Obrázek 72 Nosník T9 po zkoušce s vykreslením trhlin

13 Vyhodnocení a porovnání výsledků

Jedna z hlavních výstupních dat byla teplota zaznamenávaná v čase pomocí termočlánků. Zaznamenával se čas, kdy se lamela účinkem vyšších teplot rozpadla nebo odpojila a nemohla tak přispívat k nosnosti nosíku. Začátek a konec testu je brán podle spuštění tepelného zařízení a kdy nastal kolaps nosíku.

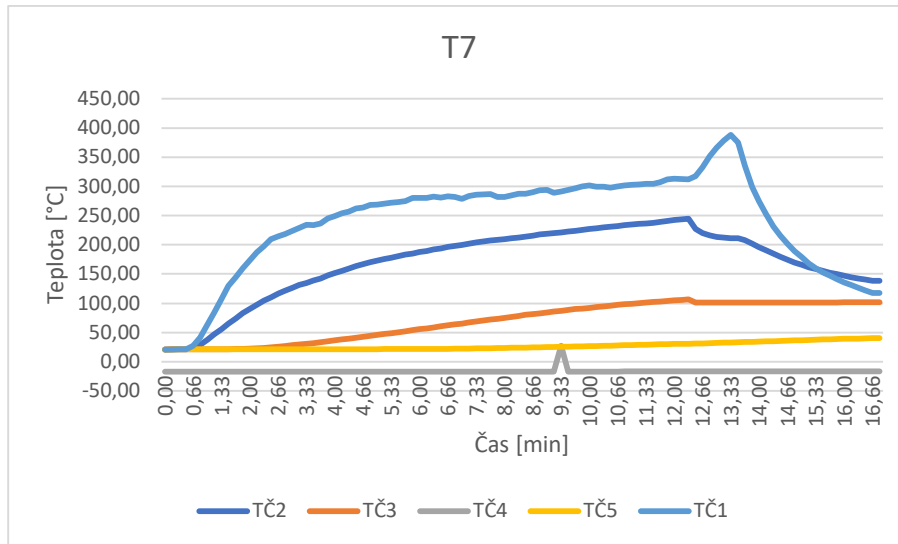
13.1 Vyhodnocení výsledků nosíku (T7)



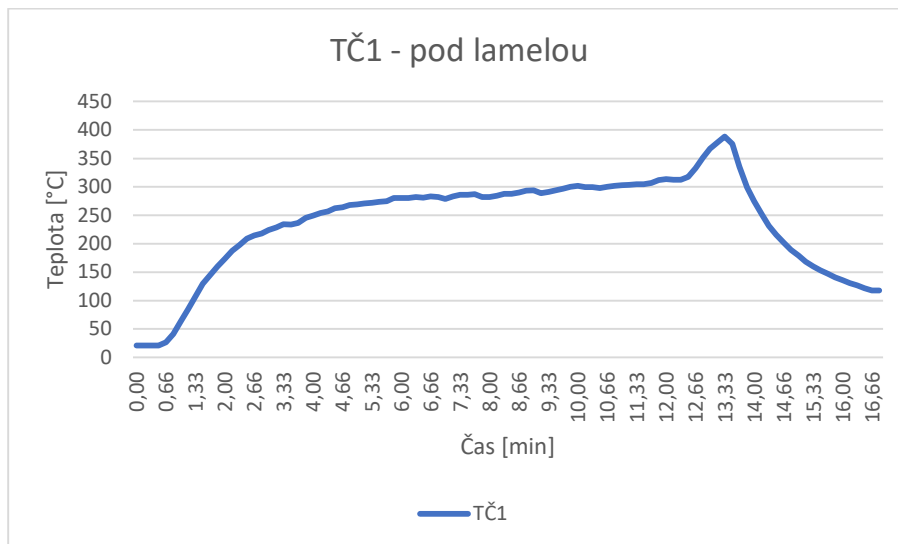
Obrázek 73 Nosník T7 po provedení zkoušky s vyznačením vzniklých trhlin

Nosník T7 (viz obrázek 73) odolával zvýšeným teplotám pod dobu 12 minut, než došlo ke kolapsu nosíku. Z grafu 2 je vidět, že teploty při kolapsu nosíku dosahovali v okolí 300 °C. V prostoru lepidla byla teplota 240 °C. V té době už proběhl skelný přechod lepidla a odpojení lamely od nosíku ve středové části. Doba skelného přechodu byla naměřena v první minutě po započetí zkoušky.

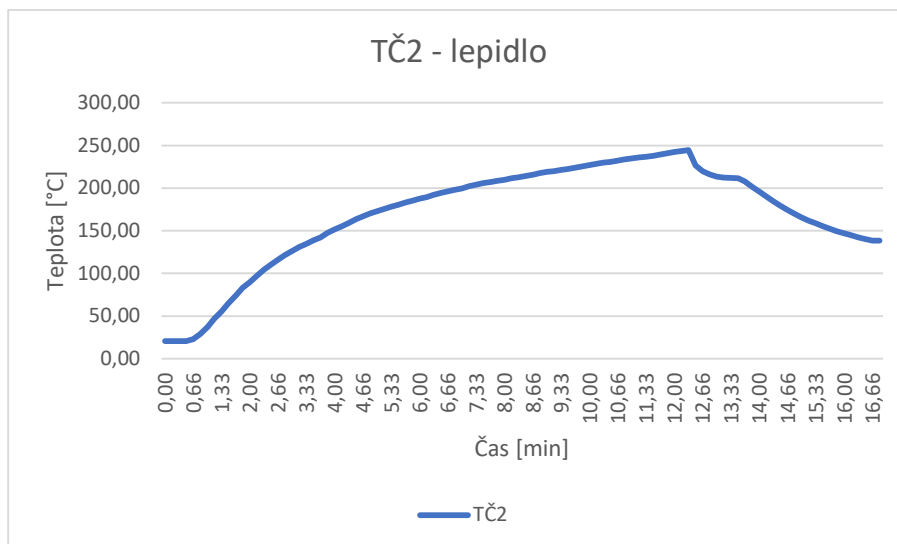
Při umístování ramena lisu došlo k poruše u termočlánku číslo 4. Tento termočlánek vykazoval celou dobu zkoušky špatné hodnoty viz graf 6.



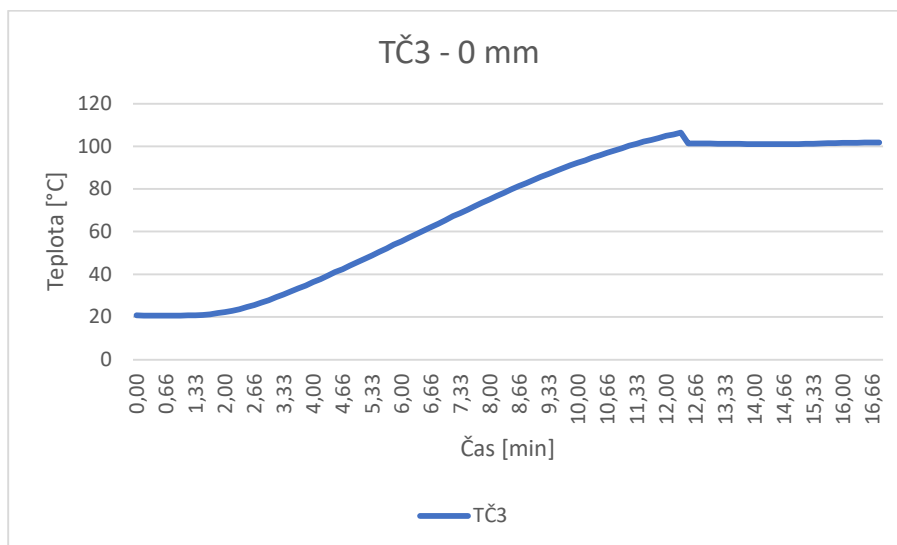
Graf 2 Hodnoty teplot v čase pro všechny umístěné termočlánky z první požární zkoušky T7



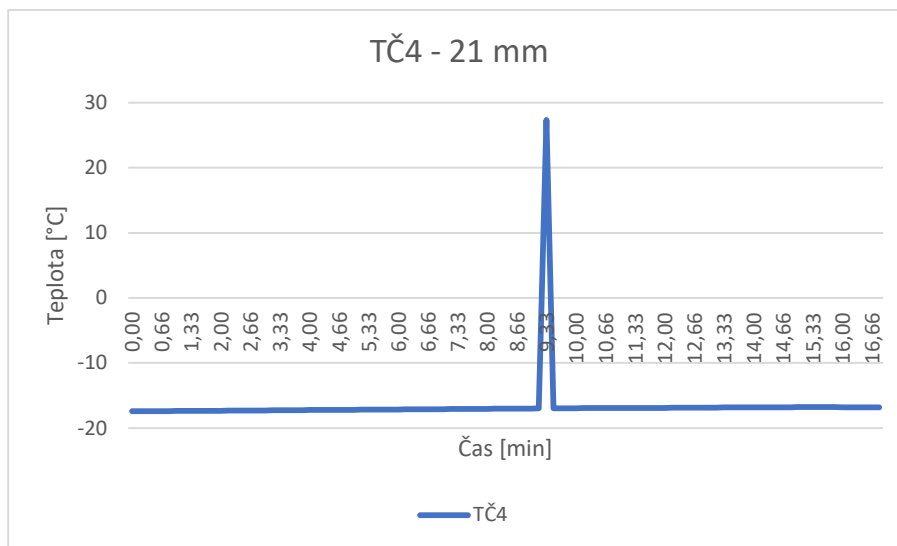
Graf 3 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek pod lamelou (TČ1)



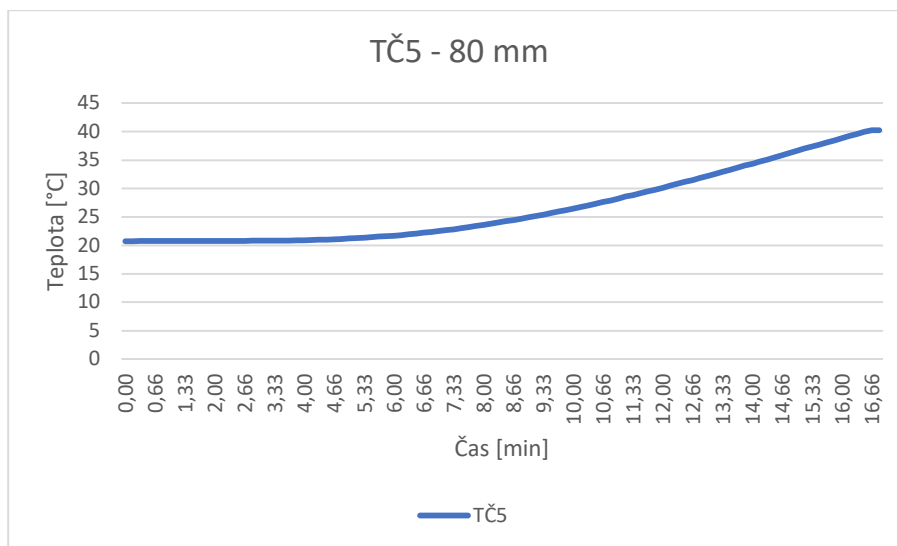
Graf 4 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v lepidle (TČ2)



Graf 5 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 0 mm (TČ3)



Graf 6 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný ve 21 mm (TČ4), hodnoty grafu jsou nefunkčního termočlátku



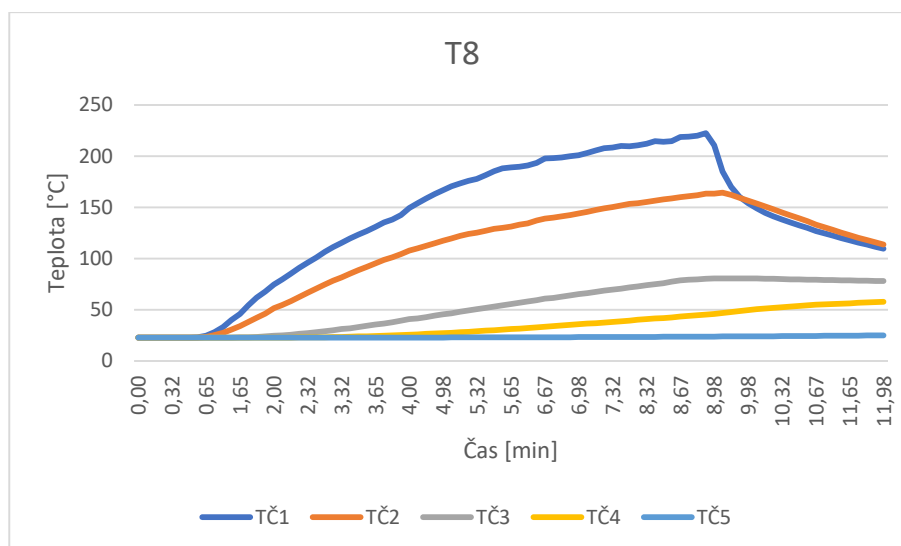
Graf 7 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 80 mm (TČ5)

13.2 Vyhodnocení výsledků nosníku (T8)

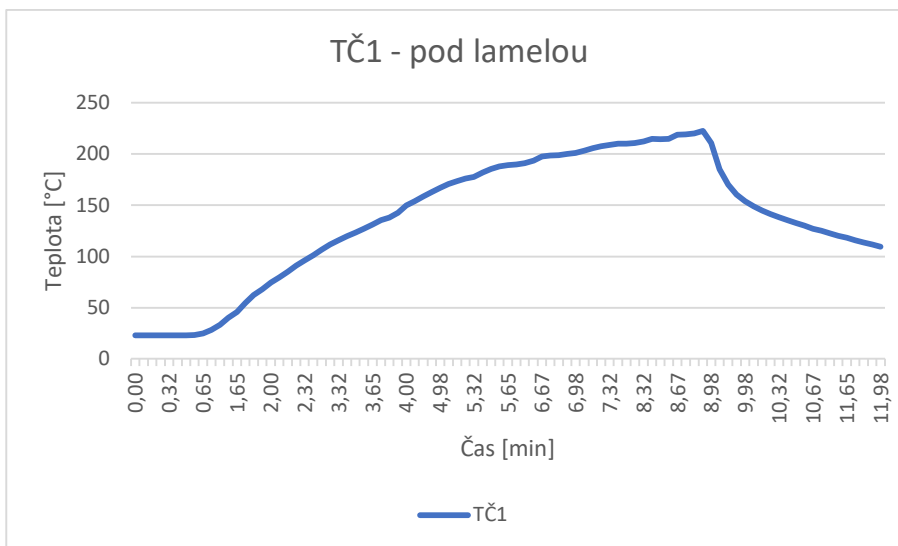


Obrázek 74 Nosník T8 po provedení zkoušky s vyznačením vzniklých trhlin

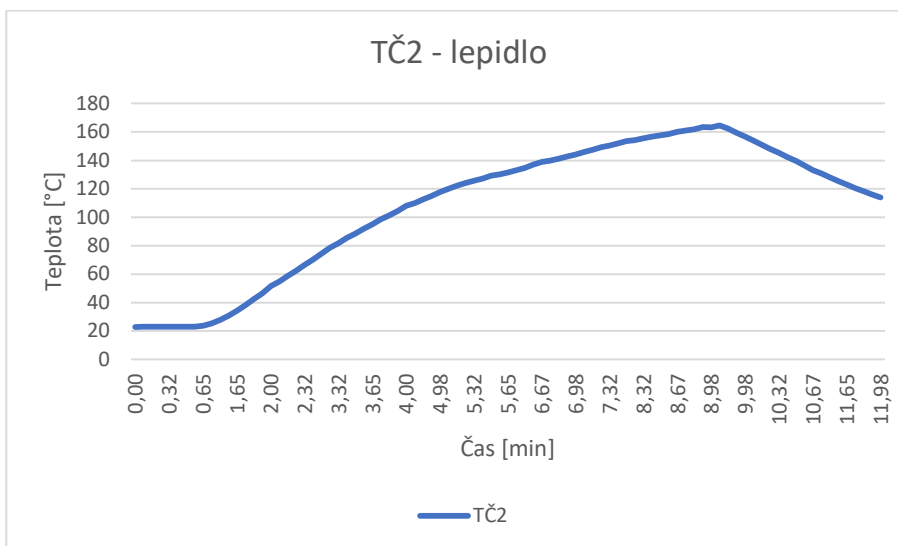
Nosník T8 (viz obrázek 74) odolával zvýšeným teplotám pod dobu 5 minut, než došlo ke kolapsu nosníku. Z grafu 8 je vidět že teploty při kolapsu nosníku dosahovaly 175 °C. V prostoru lepidla byla teplota 120 °C. V té době už proběhl skelný přechod lepidla a odpojení lamely od nosníku ve středové části. Doba skelného přechodu byla naměřena v druhé minutě po započetí zkoušky. Spodní výztuž nosníku byla vystavena v 5 minutách teplotám 23 °C. Termočlánek umístěn v prostoru 0 mm tedy na povrchu nosníku dosáhl teploty 48 °C.



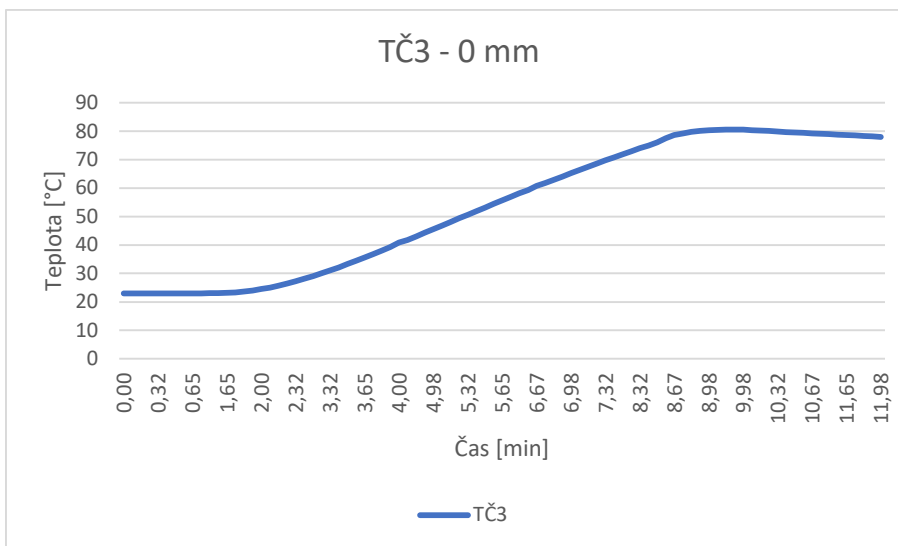
Graf 8 Hodnoty teplot v čase pro všechny umístěné termočlánky z druhé požární zkoušky



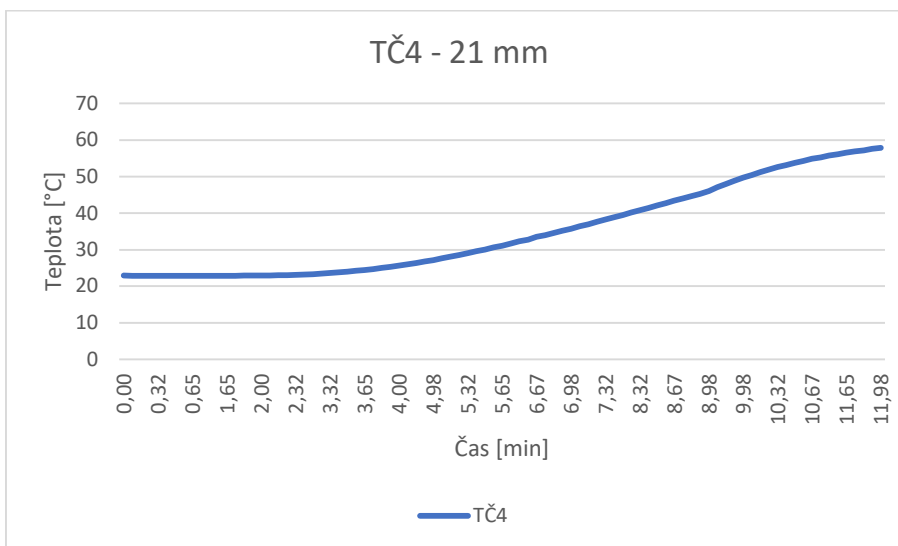
Graf 9 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek pod lamelou (TČ1)



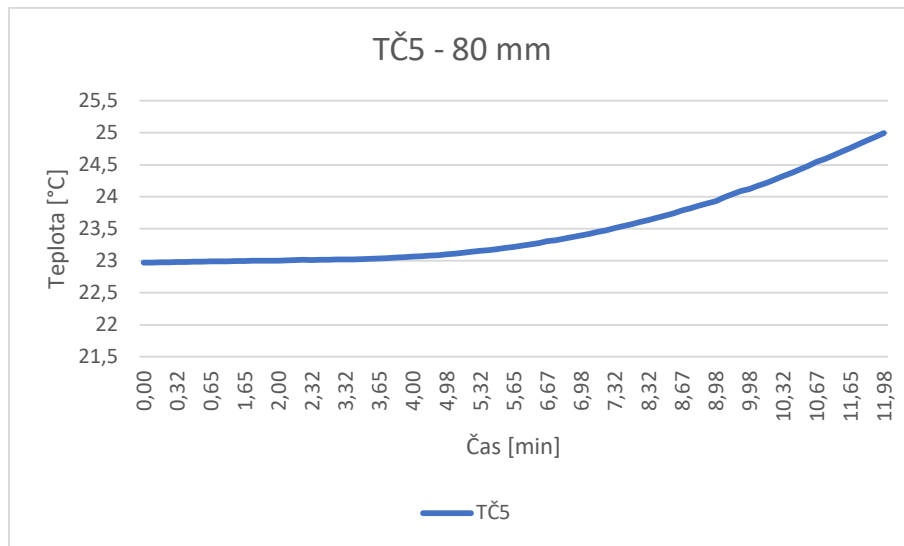
Graf 10 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v lepidle (TČ2)



Graf 11 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 0 mm (TČ3)



Graf 12 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný ve 21 mm (TČ4)



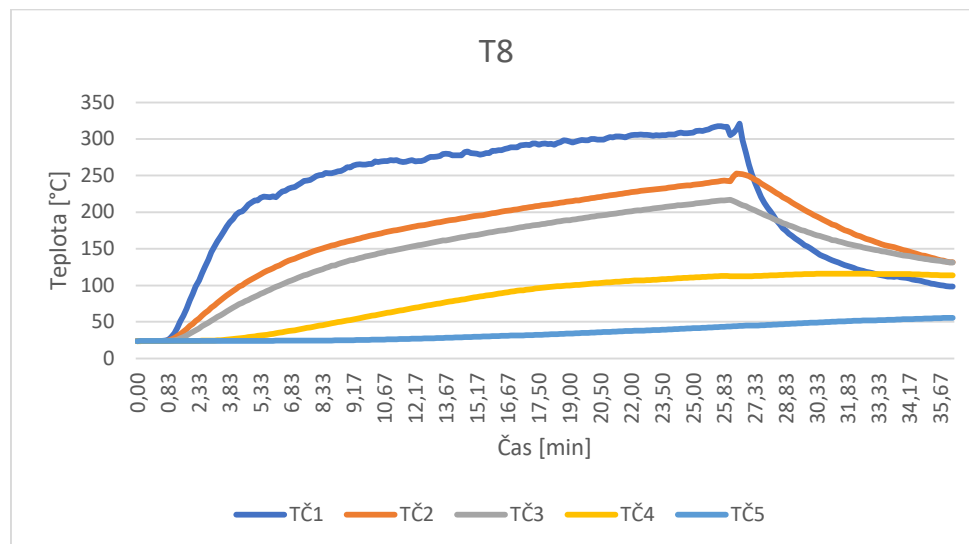
Graf 13 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 80 mm (TČ5)

13.3 Vyhodnocení výsledků nosníku (T9)

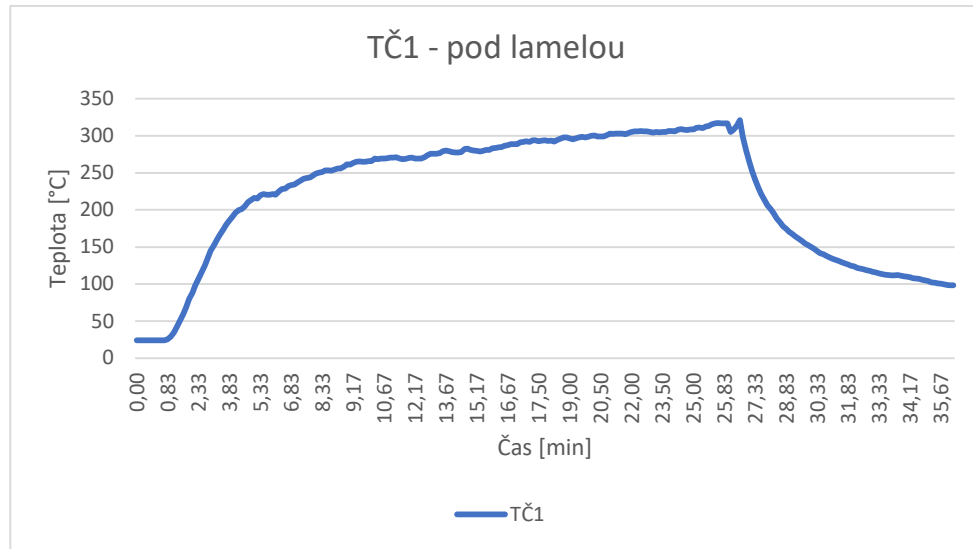


Obrázek 75 Nosník T9 po provedení zkoušky s vyznačením vzniklých trhlin

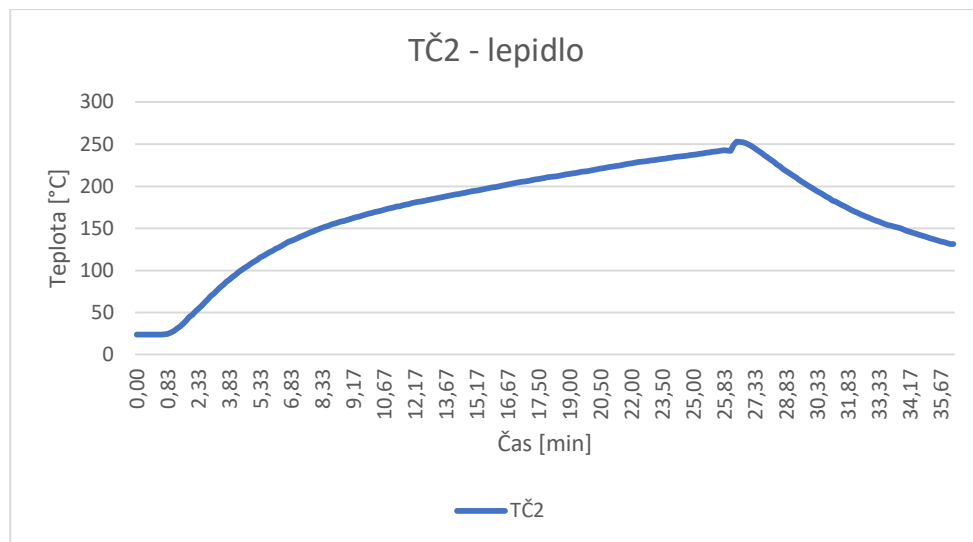
Nosník T9 (viz obrázek 75) odolával zvýšeným teplotám pod dobu 15 minut, než došlo ke kolapsu nosníku. Z grafu 14 je vidět že teploty při kolapsu nosníku dosahovaly v okolí 280 °C. V prostoru lepidla byla teplota 193 °C. V té době už proběhl skelný přechod lepidla a odpojení lamely od nosníku ve středové části. Doba skelného přechodu byla naměřena v druhé minutě po započetí zkoušky. Spodní výztuž nosníku byla vystavena v 15 minutách teplotám 83 °C. Termočlánek umístěn v prostoru 0 mm tedy na povrchu nosníku dosáhl teploty 168 °C.



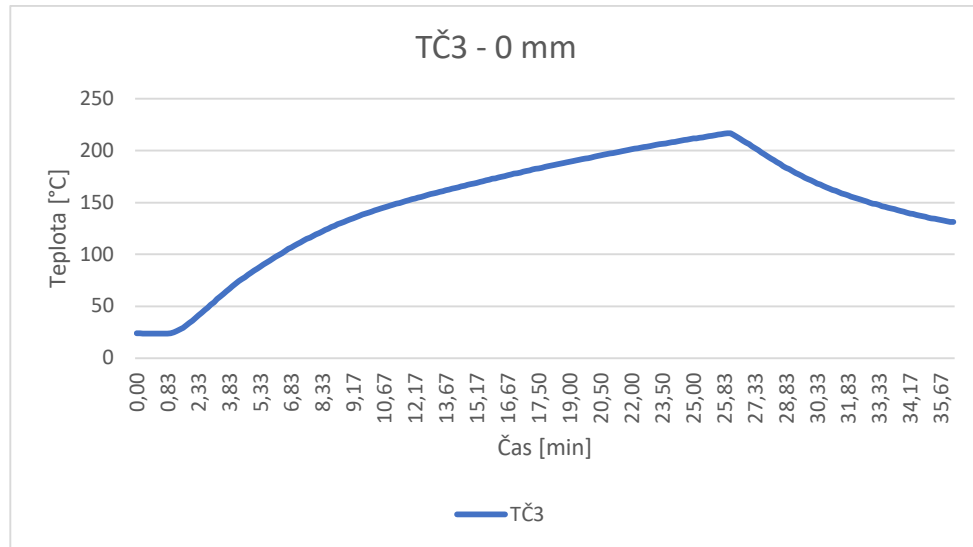
Graf 14 Hodnoty teplot v čase pro všechny umístěné termočlánky z třetí požární zkoušky



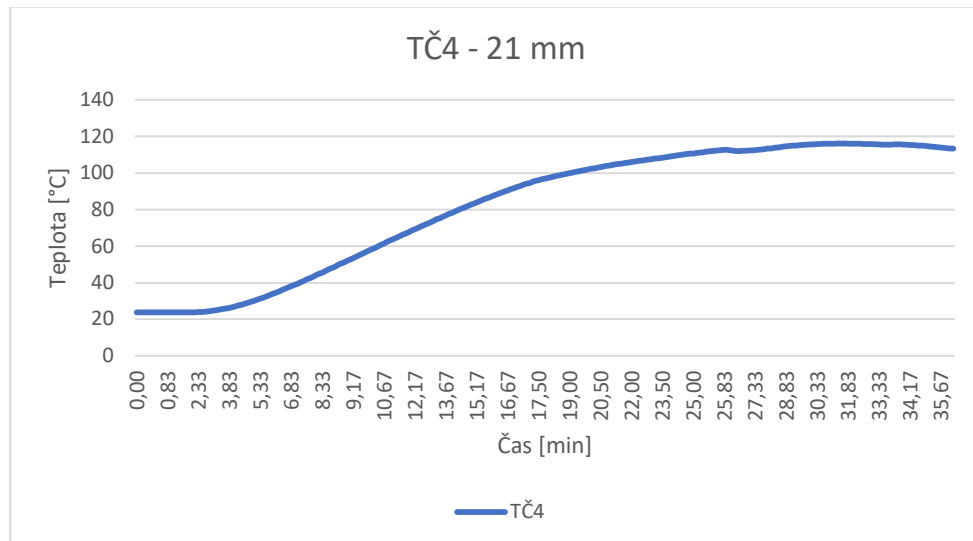
Graf 15 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek pod lamelou (TČ1)



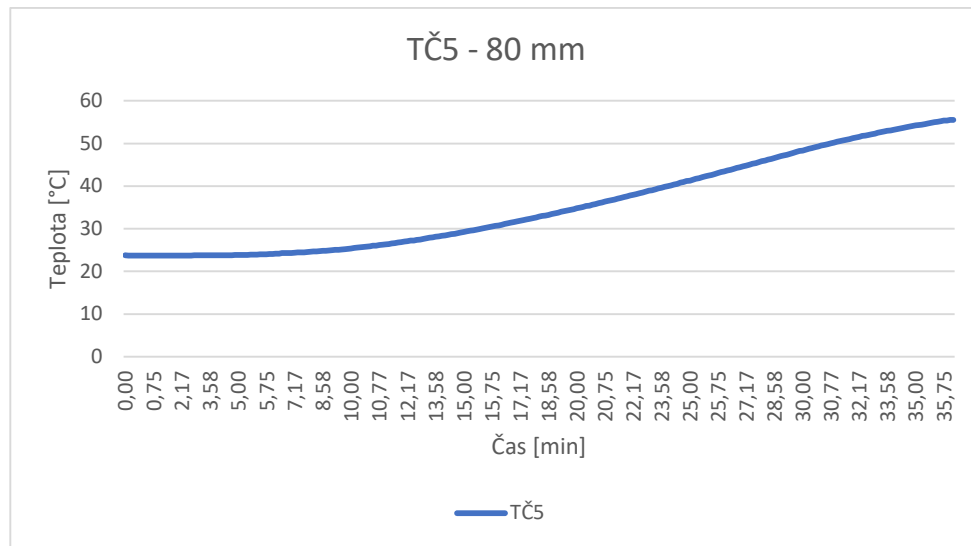
Graf 16 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v lepidle (TČ2)



Graf 17 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 0 mm (TČ3)



Graf 18 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný ve 21 mm (TČ4)



Graf 19 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 80 mm (TČ5)

13.4 Porovnání výsledků

Všechny tři nosníky nevydržely déle než 15 minut. Teploty naměřené při zkouškách dosahovaly až 300 °C. Nejdéle byl testován nosník T9 podobu 15 minut. Nejkratší dobu zvýšených teplot vydržel nosník T8, který už v 5 minutě byl porušen.

U všech nosníků došlo k teplotě skleného přechodu lepícího materiálu. Nejdéle do dvou minut od začátku spuštění požární zkoušky. Jedná se o prostřední část nosníku, která byla vystavena zvýšeným teplotám. Dá se předpokládat, že v kotvících místech na stranách nosníku byla teplota lepícího materiálu nižší, a proto nedošlo ke kolapsu už v prvních dvou minutách.

Výztuž nebyla teplotou příliš zasažena. Nejvíce tak došlo u zkoušky nosníku T9, kde teploty v úrovni spodní výztuže dosahovaly 83 °C.

Teploty u všech tří zkoušek měly pozvolný nárůst asi po 1 minutu se teplota zvyšovala minimálně. Po jedné minutě se teploty začaly výrazně měnit. V páté minutě dosahovala teplota 200 °C. Nárůst teploty pokračoval po páté minutě pozvolněji až k 300 °C ve 20 minutě.

14 Vyhodnocení experimentální analýzy

Experimenty provedenými u nás na Fakultě stavební ČVUT, byly ověřeny vlastnosti uhlíkových lamel. Předpověď chování zesílených nosníku byla naplněna: pro žádný z nosníku netrvala zkouška déle než 15 minut a teploty nepřesáhly více než 300 °C. U všech nosníků došlo ve středové části, kde byl zesílený nosník vystaven požáru, k odlepení lepicí pryskyřice od uhlíkových lamel. Také nedošlo u žádného z nosníku k přetržení hlavní nosné výztuže. U všech nosníků došlo k odtržení kotvení oblasti uhlíkové lamely na jedné ze stran nosníku a poté následoval vznik smykové trhliny a kolaps zesíleného nosníku.

Zkouška požární odolnosti provedená na neizolovaném zesíleném nosníku potvrdila náchylnost zpevňovacích systémů CFRP k vysokým teplotám v tomto případě se pás CFRP oddělil v zahřívané oblasti již po 2 minutách hoření. Pokud by byl systém CFRP vystaven po celé délce došlo by pravděpodobně k ukončení zkoušky již v 2 minutě, která odpovídá teplotě skelného přechodu (52°C).

Tabulka 7 je srovnání dosažených teplot při porušení zesíleného nosníku. Pro každý nosník je vypsán čas porušení a příslušná teplota povrchu lamely.

Tabulka 7 Naměřená maximální teplota povrchu lamely v čase porušení

Nosník	Čas (min)	Teplota (°C)
T7	12	300
T8	5	175
T9	15	280

15 Závěr

Úvodem práce byly shrnuty teoretické poznatky, které se týkají znalostí ohledně problematiky využití lamel, způsobů uložení lamel, druhy vláken lamel, možnosti ochrany před zvýšenými teplotami a popsán je zde i postup aplikace lamely na konstrukci.

V textu diplomové práce je kapitola, kde byly popsány studie současných provedených experimentů na konstrukcích zesílených uhlíkovými lamely. Popis studií se týkal popisu daného provedeného experimentu, jaké byly výsledky a jaké závěry z nich vyplývají. Ve výsledcích bylo především popsáno, jaké byly dosaženy teploty nebo fotky s popisem poruch zkušebního prvku. Všechny studie se shodovaly na podobných závěrech. Jak o způsobu ochrany, tak o způsobu porušení daného ohraného systému zvýšenými teplotami.

Hlavním bodem diplomové práce byla příprava a provedení experimentu na nosnících zesílených uhlíkovými lamely v prostorách Fakulty stavební ČVUT. V přípravě bylo popsáno veškeré použité zařízení včetně materiálů, které bylo potřeba pro provedení zkoušky požární odolnosti a popisu zkušebních vzorku v tomto případě nosníků zesílených uhlíkovými lamelami. Podrobně byla popsána výroba zkušebních prvků a jejich následné zesílení pomocí uhlíkové lamely. Zároveň s výrobou nosníků pro experiment požární odolnosti byly z navržené směsi vyrobeny zkušební krychle pro stanovení pevností v tlaku.

Experimentální analýza provedená v diplomové práci nám přiblížila chování zesílených nosníku za působení zvýšených teplot. Popsán je průběh celého experimentu od začátku do konce a popis je doplněn o fotografie k lepšímu výkladu. Závěrem a hlavním výsledkem experimentální části diplomové práce bylo vyhodnocení stanovení dosažených teplot, které odpovídaly očekávaným velikostem.

Přínosem práce je ověření funkčnosti provedeného experimentu při zvýšených teplotách. Kde v budoucím výzkumu lze provést experimenty na zesílených nosnících pomocí uhlíkových lamel nové generace, od kterých se očekává lepší požární odolnost.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Skica uložení lamely na povrch nosné konstrukce (a) nosníku, b) desky): 1 – stávající nosná konstrukce, 2 – uhlíková lamela, 3 – protipožární pohled	13
Obrázek 2 Skica uložení lamely vsazováním do nosné konstrukce (a) nosníku, b) desky): 1 – uhlíková lamela, 2 – stávající nosná konstrukce, 3 – prostor vytvořené drážky.....	13
Obrázek 3 Uhlíková vlákna [11]	15
Obrázek 4 Skleněná vlákna [13].....	16
Obrázek 5 Aramidová vlákna [16].....	17
Obrázek 6 Přírodní vlákna [18]	17
Obrázek 7 Skica ochrany lamel pohledem: 1 – stávající nosná konstrukce, 2 – uhlíková lamela, 3 – protipožární pohled.....	19
Obrázek 8 Skica ochrana lamel obkladem: 1 – stávající nosná konstrukce, 2 – uhlíková lamela, 3 – protipožární obklad.....	19
Obrázek 9 Skica ochrany nástřikem, a) okolo celého nosníku, b) nástřik aplikován jen na spodní stranu nosníku: 1 – stávající nosná konstrukce, 2 – uhlíková lamela, 3 – protipožární nástřik.....	20
Obrázek 10 Geometrie a detaily ocelové výztuže, převzato z [23], Fig. 3.	20
Obrázek 11 Systém mechanického kotvení, převzato z [23], Fig. 4.	21
Obrázek 12 Ilustrace způsobu ochrany a termočlánků, převzato z [23], Fig. 5.....	21
Obrázek 13 Naměřená teplota v závislosti na době požáru pro první sérii požární zkoušky, převzato z [23], Fig. 13.....	22
Obrázek 14 Naměřená teplota v závislosti na době požáru pro druhou sérii požární zkoušky, převzato z [23], Fig. 14.....	23
Obrázek 15 Geometrie a určení řezů A,B a C, převzato z [24], Fig. 1.	24
Obrázek 16 Podrobnosti o průřezu a umístění termočlánků a tenzometrů, převzato z [24], Fig. 1.....	25
Obrázek 17 Průřez středního rozpětí ukazující umístění termočlánků, převzato z [24], Fig. 1.	25
Obrázek 18 Naměřené teploty jako funkce doby požární expozice pro nosníky B1 – B4, převzato z [24], Fig. 3.	26
Obrázek 19 Podrobnosti o izolaci a termočlánku pro vzorky, převzato z [25], Fig. 1.....	27
Obrázek 20 Uspořádání zkoušky, převzato z [25], Fig. 2.....	27
Obrázek 21 Teplota zaznamenaná na různých místech paprsků během požární zkoušky, převzato z [25], Fig. 3.	28
Obrázek 22 Geometrie zkušebních vzorků: (a) podélný pohled na vzorek s mechanickým ukotvením na koncích pásu CFRP ; b) průřez; c) průřez s mechanickým ukotvením; d) podélná geometrie systému požární ochrany, převzato z [26], Fig. 1.....	30
Obrázek 23 Umístění termočlánků (a) v lepidle podél lepené délky a (b) ve střední části, převzato z [26], Fig. 4.	30

Obrázek 24 Teploty v lepidle, když se systém CFRP rozpojil: (a) podél lepeného rozhraní; b) průměr podél délky kotvení, převzato z [26], Fig. 6.	31
Obrázek 25 Příklady způsobů porušení CFRP : (a) nosník 0-0; (b) nosník 25-0; (c) nosník A-0-0, převzato z [26], Fig. 8.	32
Obrázek 26 Použité techniky geometrie a zpevnění desek: (a) EBR, (b) NSM a (c) CREatE (rozměry v mm), převzato z [27], Fig. 1.	34
Obrázek 27 Hlavní kroky pro aplikaci zesilovacího systému CREatE: (a) otevření otvorů o délce L_a v úhlu odchyly α ; b) provedení přechodové křivky s poloměrem R ; (c) čištění otvorů kartáčem a vyfukovacím čerpadlem; (d) vstřikování pojiva do otvorů; e) nanesení pojiva na povrch betonu; a (f) instalace výztuže pro zesílení železobetonových desek, , převzato z [27], Fig. 2., [28].	34
Obrázek 28 Uspořádání zkoušky požární odolnosti: (a) celkový pohled na zkoušky, (b) čelní pohled na zkoušenou desku s otevřenou pecí a (c) podélné schéma zkoušek. Rozměry v mm. , převzato z [27], Fig. 4.	35
Obrázek 29 Umístění termočlánků (červená) a snímačů posunu (modrá) v sekcích středního rozpětí a v kotevních zónách pásů CFRP pro vyztužené desky (a) EBR (b) NSM a (c) CREatE; všechny rozměry v mm, převzato z [27], Fig. 5.	36
Obrázek 30 Režimy selhání desek při zkoušení při teplotě okolí: (a) železobeton, (b) EBR, (c) NSM ad) CREatE, převzato z [27], Fig. 7.	36
Obrázek 31 Pozorování desek po požáru zesílené technikou EBR, převzato z [27], Fig. 10.	37
Obrázek 32 Pozorování desek po požáru zesílené technikou NSM, převzato z [27], Fig. 11.	37
Obrázek 33 Pozorování desek po požáru zesílené technikou CREatE, převzato z [27], Fig. 12.	38
Obrázek 34 (a) Požární odolnost zpevňovacích technik a (b) minimální průměrná teplota v kotevních zónách při rozpojení CFRP – „Kritické“ teploty definované přerušovanou čarou pro EBR, plnou čarou pro NSM a tečkovanou čarou pro CREatE posilovací techniku. *Hodnoty odpovídající T9 (levé ukotvení) nebo T12 (pravé kotvení), protože v těchto deskách byly ztraceny některé hodnoty zbývajících kotevních termočlánků (T8, T10, T11 a T13), převzato z [27], Fig. 15.	38
Obrázek 35 Skica nosníku.	41
Obrázek 36 Skica zatížení nosníku.	42
Obrázek 37 Složené bednění připravené na betonáž.	42
Obrázek 38 Rozměr bednění.	42
Obrázek 39 Schéma vyztužení železobetonového trámu.	43
Obrázek 40 Vzdálenost třmínků na osu cca 90mm.	44
Obrázek 41 Hotová namíchaná betonová směs na betonáž.	45
Obrázek 42 Kamenivo frakce 8–16 mm.	45
Obrázek 43 Písek frakce 0–4 mm.	45

Obrázek 44 CFRP lamela aplikovaná na nosník.....	46
Obrázek 45 Zahřívací zařízení [39].....	47
Obrázek 46 Keramické dečky [40]	48
Obrázek 47 Sálavý plynový hořák (Světelný zářič) [41].....	48
Obrázek 48 Skica řezu nosníku s vyznačením umístění termočlánků	49
Obrázek 49 Skica podélného řezu nosníkem s vyznačením umístění termočlánků	49
Obrázek 50 Foto označení použitých termočlánků	50
Obrázek 51 Termočlánek připevněný pod lamelou	50
Obrázek 52 Hydraulický lis FP100	51
Obrázek 53 Bednění.....	52
Obrázek 54 Uložení výztuže do bednění.....	52
Obrázek 55 Připevnění termočlánků do bednění.....	52
Obrázek 56 Konečné zalití bednění betonem	53
Obrázek 57 Přikrytí čerstvého betonu folií.....	53
Obrázek 58 Finální trámy po 28 dnech	53
Obrázek 59 Lamela nalepená na nosníku	54
Obrázek 60 Dva dodatečně zesílené nosníky	55
Obrázek 61 Místo provedení požární zkoušky	57
Obrázek 62 Notebook zaznamenávající data teplot v čase	57
Obrázek 63 Datalogger propojený s termočlánky.....	57
Obrázek 64 Nosník připravený ke zkoušce.....	58
Obrázek 65 Sálavé zařízení působící na nosník	58
Obrázek 66 Ochrana lisu před účinky zvýšených teplot.....	59
Obrázek 67 Nosník T7 po zkoušce s vykreslením trhlin.....	61
Obrázek 68 Detail nosníku T7.....	61
Obrázek 69 Porušení nosíku T8 po ukončení zkoušky.....	62
Obrázek 70 Nosník T8 s odtrženou lamelou, uprostřed lze vidět zbylé lepidlo co se odlepilo od lamely, pravá část je odtržena až po zkoušce ručně i zde lepidlo s lamelou zůstalo.....	63
Obrázek 71 Pohled na neporušenou výztuž nosíku T8.....	63
Obrázek 72 Nosník T9 po zkoušce s vykreslením trhlin.....	64
Obrázek 73 Nosník T7 po provedení zkoušky s vyznačením vzniklých trhlin.....	65
Obrázek 74 Nosník T8 po provedení zkoušky s vyznačením vzniklých trhlin.....	69
Obrázek 75 Nosník T9 po provedení zkoušky s vyznačením vzniklých trhlin.....	73

Seznam tabulek

Tabulka 1 Celkový objem těles	41
Tabulka 2 Výkaz výztuže včetně tvaru prutů	43
Tabulka 3 Hmotnostní poměr betonové směsi s hmotností v gramech	44
Tabulka 4 Vlastnosti lamely CFRC typ Sika CarboDur S 512 – bm [37]	46
Tabulka 5 Objemová hmotnost zkušebních prvků	55
Tabulka 6 Stanovení síly a pevnosti v tlaku	56
Tabulka 7 Naměřená maximální teplota povrchu lamely v čase porušení	77

Seznam grafů

Graf 1 Znárodnění zatěžování nosníku silou (od 40 kN se síla ustálila konstantně)	60
Graf 2 Hodnoty teplot v čase pro všechny umístěné termočlánky z první požární zkoušky T7	66
Graf 3 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek pod lamelou (TČ1)	66
Graf 4 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v lepidle (TČ2). 67	
Graf 5 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 0 mm (TČ3) ...	67
Graf 6 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný ve 21 mm (TČ4), hodnoty grafu jsou nefunkčního termočlánku	68
Graf 7 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 80 mm (TČ5)	68
Graf 8 Hodnoty teplot v čase pro všechny umístěné termočlánky z druhé požární zkoušky	69
Graf 9 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek pod lamelou (TČ1)	70
Graf 10 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v lepidle (TČ2)	70
Graf 11 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 0 mm (TČ3)	71
Graf 12 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný ve 21 mm (TČ4)	71
Graf 13 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 80 mm (TČ5)	72
Graf 14 Hodnoty teplot v čase pro všechny umístěné termočlánky z třetí požární zkoušky	73
Graf 15 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek pod lamelou (TČ1)	74
Graf 16 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v lepidle (TČ2)	74
Graf 17 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 0 mm (TČ3)	75
Graf 18 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný ve 21 mm (TČ4)	75
Graf 19 Hodnoty teplot zaznamenané v čase pro termočlánek umístěný v 80 mm (TČ5)	76

Literatura

- [1] Animato (www.animato.cz), Studio. „Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží". Časopis Stavebnictví. Viděno 2. leden 2024. <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi.html>.
- [2] „Zesilování konstrukcí uhlíkové lamely | MOPED, s.r.o." Viděno 2. leden 2024. http://www.moped.cz/zesilovani_konstrukci.
- [3] TIETZ, Roman. Použití kompozitních materiálů při zesilování zděných konstrukcí po-zemních staveb [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2024-01-01]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/cs4guf/>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební. Vedoucí práce Jaroslav Solař.
- [4] „externí uhlíkové výztuže – TESAN". Viděno 2. leden 2024. <https://www.tesan.cz/externi-lepene-uhlikove-vystuze/>.
- [5] „Cz – Metodická příručka Zesilování konstrukcí.pdf". Viděno 2. leden 2024. <https://cze.sika.com/dam/dms/cz01/0/MP-cz-Sika%20CarboDur.pdf>.
- [6] „ZvysovaniUnosnostiBetonuPomociPrvkuMBrace.pdf". Viděno 2. leden 2024. <http://severstav.cz/KeStazeni/SkladBASF/Prospekty/ZvysovaniUnosnostiBetonuPomociPrvkuMBrace.pdf>.
- [7] Huang, Xiaosong. „Fabrication and Properties of Carbon Fibers". *Materials* 2, č. 4 (prosinec 2009): 2369–2403. <https://doi.org/10.3390/ma2042369>.
- [8] EHRENSTEIN, Gottfried Wilhelm. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6
- [9] Malínková, Lenka. „Zesilování Železobetonových Konstrukcí Kompozitními Materiály", 27. červen 2023. <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/110332>.
- [10] „ZESILOVÁNÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ EXTERNĚ LEPENOU KOMPOZITNÍ VÝZTUŽÍ – PDF Stažení zdarma". Viděno 2. leden 2024. <https://docplayer.cz/19174883-Zesilovani-stavebnich-konstrukci-externe-lepenou-kompozitni-vyztuzi.html>.
- [11] Swift Fiber. „Carbon Fiber". Viděno 2. leden 2024. <https://swift-fiber.com/fibers/carbon-fiber/>.
- [12] Etcheverry, Mariana, a Silvia E. Barbosa. „Glass Fiber Reinforced Polypropylene Mechanical Properties Enhancement by Adhesion Improvement". *Materials* 5, č. 6 (červen 2012): 1084–1113. <https://doi.org/10.3390/ma5061084>.
- [13] „Továrna výrobců dodavatelů na zakázku ze skelných vláken Direct Roving". Viděno 2. leden 2024. <https://cz.glassfiberfactory.com/fiberglass/single-end-fiberglass-roving/fiberglass-direct-roving.html>.
- [14] Kiron, Mazharul Islam. „Aramid Fibers: Types, Properties, Manufacturing Process and Applications". *Textile Learner* (blog), 18. listopad 2015. <https://textilelearner.net/aramid-fibers-types-properties-manufacturing-process-and-applications/>.
- [15] Ertekin, Mustafa. „Aramid fibers". In *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, 153–67, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00007-2>.
- [16] CS Hyde Company. „Kevlar® Aramid Fabric | CS Hyde Company | 800-461-4161". Viděno 2. leden 2024. <https://catalog.cshyde.com/viewitems/ptfe-coated-fabrics/kevlar-nomex-aramid-fabric>.

- [17] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "natural fibre". Encyclopedia Britannica, 22 May. 2020, <https://www.britannica.com/topic/natural-fiber>. Accessed 2 January 2024.
- [18] Zedster66. „Natural Wools and Natural Fibres". Felting and Fiber Studio, 28. únor 2012. <https://feltingandfiberstudio.com/2012/02/28/natural-wools-and-natural-fibres/>.
- [19] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 80-214-2443-5
- [20] „Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí – CEP – TA ČR Starfos". Kód projektu: FW06010142.
- [21] Johnson, R. et al. (2017). Strengthening of Bridges using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites. *Procedia Engineering*, 189, 369-376. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.137
- [22] Manning, D. et al. (2018). Strengthening of RC Slabs with Carbon Fibre Reinforced Polymers: Numerical and Experimental Study. *Composite Structures*, 189, 22-34. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.03.035.
- [23] Dong, Kun, Ke-Xu Hu, Wan-Yang Gao, a Shu-Tong Yang. „Fire endurance tests of CFRP-strengthened RC beams with different insulation schemes". *Structures* 56 (1. říjen 2023): 104887. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104887>.
- [24] Ahmed, Aqeel, a Venkatesh Kodur. „The experimental behavior of FRP-strengthened RC beams subjected to design fire exposure". *Engineering Structures* 33, č. 7 (1. červenec 2011): 2201–11. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.03.010>.
- [25] Dong, Kun, Kexu Hu, a Wanyang Gao. „Fire Behavior of Full-Scale CFRP-Strengthened RC Beams Protected with Different Insulation Systems". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 15, č. 3 (1. září 2016): 581–88. <https://doi.org/10.3130/jaabe.15.581>.
- [26] Firmo, J. P., a J. R. Correia. „Fire behaviour of thermally insulated RC beams strengthened with EBR-CFRP strips: Experimental study". *Composite Structures* 122 (1. duben 2015): 144–54. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.063>.
- [27] Azevedo, A. S., J. P. Firmo, J. R. Correia, C. Chastre, H. Biscaia, a N. Franco. „Fire behaviour of CFRP-strengthened RC slabs using different techniques – EBR, NSM and CREaTE". *Composites Part B: Engineering* 230 (1. únor 2022): 109471. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109471>.
- [28] Franco, N., C. Chastre, a H. Biscaia. „Strengthening RC Beams Using Stainless Steel Continuous Reinforcement Embedded at Ends". *Journal of Structural Engineering (United States)* 146, č. 5 (2020). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002606](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002606).
- [29] Turkowski, Piotr, Marek Łukomski, Paweł Sulik, a Paweł Roszkowski. „Fire Resistance of CFRP-strengthened Reinforced Concrete Beams under Various Load Levels". *Procedia Engineering, Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 172 (1. leden 2017): 1176–83. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.137>.
- [30] Palmieri, Aniello, Stijn Matthys, a Luc Taerwe. „Experimental investigation on fire endurance of insulated concrete beams strengthened with near surface mounted

- FRP bar reinforcement". *Composites Part B: Engineering* 43, č. 3 (1. duben 2012): 885–95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.061>.
- [31] Azevedo, Adriana S., João P. Firmo, João R. Correia, Reza M. Firouz, a Joaquim A. O. Barros. „Fire behaviour of reinforced concrete slab strips strengthened with prestressed NSM-CFRP laminates". *Engineering Structures* 297 (15. prosinec 2023): 116982. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116982>.
- [32] Turkowski, Piotr, Marek Łukomski, Paweł Sulik, a Paweł Roszkowski. „Fire Resistance of CFRP-strengthened Reinforced Concrete Beams under Various Load Levels". *Procedia Engineering, Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 172 (1. leden 2017): 1176–83. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.137>.
- [33] Abdulrahman, Alan Saeed, a Mohamed Raouf Abdul Kadir. „Behavior and flexural strength of fire damaged high strength reinforced rectangular concrete beams after strengthening with CFRP laminates". *Ain Shams Engineering Journal* 13, č. 6 (1. listopad 2022): 101767. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101767>.
- [34] Abdulrahman, Alan Saeed, a Mohamed Raouf Abdul Kadir. „Behavior and flexural strength of fire-damaged high-strength reinforced rectangular concrete beams with tension or compression zones exposed to fire repaired with CFRP sheets". *Case Studies in Construction Materials* 15 (1. prosinec 2021): e00779. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00779>.
- [35] Kazmina, Valeriia. „Experimentální a numerická analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami", 2023.
- [36] ČSN 73 6174 (736174) Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem - 11/1994
- [37] „sika_carbodur_s.pdf". Viděno 2. leden 2024. https://cze.sika.com/dam/dms/cz01/0/sika_carbodur_s.pdf.
- [38] „sikadur_-30.pdf". Viděno 2. leden 2024. https://cze.sika.com/dam/dms/cz01/4/sikadur_-30.pdf.
- [39] a.s, Alza. „ELÍZ EQH 150 - Infrazářič | Alza.cz". Alza. Viděno 2. leden 2024. <https://www.alza.cz/eliz-eqh-150-d5476500.htm>.
- [40] Holan, J., J. Novák, P. Müller, a R. Štefan. „Experimental Investigation of the Compressive Strength of Normal-Strength Air-Entrained Concrete at High Temperatures". *Construction and Building Materials* 248 (10. červenec 2020): 118662. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118662>.
- [41] Štefan, R., J. Procházka, J. Novák, J. Fládr, F. Wald, A. Kohoutková, L. Scheinherrová, a M. Čáchová. „Heat Transfer in Hybrid Fibre Reinforced Concrete-Steel Composite Column Exposed to a Gas-Fired Radiant Heater". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 246, č. 1 (září 2017): 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/246/1/012050>.
- [42] ČSN EN 60584-1 ED.2 (258331)Termoelektrické články – Část 1: Údaje napětí a tolerance - 06/2014
- [43] HAVLŮJ, J. Metody měření teploty v betonu vystaveném vysokým teplotám. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT.
- [44] ČSN EN 1363-1 (730851) Zkoušky požární odolnosti – Část 1: Obecné požadavky, 11/2021

- [45] ČSN EN 12390-3 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles - 05/2020
- [46] ČSN EN 206+A2 (732403) Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda 11/2021