



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**PROBLEMATIKA ODOLNOSTI BETONŮ VŮČI
PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLŮT**

THE ISSUE OF CONCRETE RESISTANCE TO HIGH TEMPERATURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB KREJČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jakub Krejčík
Název	Problematika odolnosti betonů vůči působení vysokých teplot
Vedoucí práce	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,

MBA

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,

MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru.

Designing Concrete Structures for Fire Safety, ACI, SP-255

Bradáčová, I. Stavby z hlediska požární bezpečnosti. ERA group, s.r.o. Brno 2007. ISBN 978-80-7366-090-1.

Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007

Drochytka, R. Trvanlivost stavebních materiálů, učební opora VUT Brno, FAST, 2008

Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (r. 2011-2016).

České a zahraniční normy. Internetové zdroje.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Beton je universální stavební materiál s dobrou odolností vůči vlivům okolního prostředí. Je nehořlavý, při působení vysokých teplot podléhá degradaci. Vhodnou modifikací složení betonu a výběrem stupních složek lze odolnost betonu vůči působení vysokých teplot zvýšit.

V teoretické části bakalářské práce proveďte rešerši literatury z oblasti chování betonů při působení vysokých teplot.

Uveďte možnosti pro zvýšení odolnosti betonů vůči působení vysokých teplot.

V experimentální části bakalářské práce vyrobte zkušební tělesa z betonu s přídavkem polypropylenových a čedičových vláken a z betonu bez přídavku vláken. Proveďte zatížení zkušebních těles na teplotu 400 °C a 800 °C. Zhodnoťte vliv působení teploty na fyzikální vlastnosti betonů a na vzhled betonů. Zhodnoťte vliv přídavku vláken na vlastnosti betonů.

Minimální rozsah bakalářské práce je 45 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá sledováním odolnosti cementových betonů vůči působení vysokých teplot. V teoretické části bakalářské práce byly popsány změny, které probíhají v betonu, který je vystaven působení vysokých teplot a chování jednotlivých složek betonu. Byly popsány možnosti jak zlepšit odolnost betonu proti působení vysokých teplot vhodnou volbou složek, nebo přidavkem rozptýlené výztuže. V experimentální části byly testovány betony s čedičovými a polypropylenovými vlákny s čedičovým kamenivem. Byly pozorovány změny pevnosti v tlaku a změny objemových hmotností v závislosti na působení vysokých teplot. Byly sledovány změny rozptýlené výztuže z polypropylenových vláken, celulóзовých a čedičových vláken po tepelném namáhání.

Klíčová slova

Čedičová vlákna, uhlíkové nanotrubičky, polypropylenová vlákna, požární odolnost, rozptýlená výztuž

Abstract

Bachelor's thesis deals with resistance of cement concrete to high temperatures. Theoretical part of bachelor's thesis describes changes that occurs in concrete at thermal loading and behavior of each component of concrete. Next there were described ways to improve resistance of concrete to high temperatures, by choosing the right component or by adding fibre reinforcement. In experimental part composites with bassalt and polypropylen fibre and with bassalt aggregates were tested. In these composites changes of compressive strength and changes of density were measured according to the thermal loading. Next individual fibre reinforcement polypropylen, cellulose and bassalt fibres were exposed to the thermal loading and their changes were observed.

Key words

Bassalt fibres, carbon nanotubes, polypropylen fibers, fire resistance, fibre reinforcement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Jakub Krejčík *Problematika odolnosti betonů vůči působení vysokých teplot*. Brno, 2017. 68 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2017

Jakub Krejčík

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří paní Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Ivetě Novákové za pomoc při provádění experimentální části práce.

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Cíle práce	13
3	Teoretická část	14
3.1	Základní pojmy a názvosloví v oblasti požáru.....	14
3.2	Chování betonu při působení vysokých teplot.....	18
3.3	Vliv vysokých teplot a ohně na běžné cementové betony	18
3.3.1	Změny vlastností betonu vystaveného působení vysokých teplot.....	20
3.3.1.1	Změna barvy betonu	20
3.3.1.2	Změna pevnosti v tlaku.....	20
3.3.2	Explozivní odprýskávání	21
3.4	Složky betonu při působení vysokých teplot	22
3.4.1	Cementový tmel při působení vysokých teplot.....	22
3.4.2	Kamenivo při působení vysokých teplot	23
3.4.3	Spolupůsobení cementového tmele a kameniva při působení vysokých teplot	24
3.4.4	Ocelová výztuž při působení vysokých teplot	25
3.5	Modifikace betonové směsi pro zlepšení požární odolnosti	26
3.6	Pojivo	26
3.7	Plnivo	26
3.8	Příměsi.....	27
3.8.1	Polypropylenová vlákna	27
3.8.2	Čedičová vlákna.....	29
3.8.2.1	Využití čedičových vláken	31
3.8.2.2	Vybrané druhy výrobků z čedičových vláken.....	32
3.8.2.3	Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken.....	33

3.8.2.4	Vliv přídavku čedičových vláken na odolnost proti působení vysokých teplot	33
3.8.3	Uhlíkové nanočástice	34
3.8.3.1	Zlepšení mechanických vlastností	35
3.8.3.2	Chování betonu s přídavkem CNT vystavenému vysokým teplotám	37
4	Experimentální část	41
4.1	I. etapa sledování vlastností betonů po tepelném zatížení	41
4.1.1	Metodika práce	41
4.1.2	Použité materiály	41
4.1.2.1	Pojivo	41
4.1.3	Plnivo	42
4.1.4	Přísady	43
4.1.4.1	Superplastifikátor CHRYSO Fluid Optima 208	43
4.1.4.2	Superplastifikátor Masterglenium SKY 507	43
4.1.5	Rozptýlená výztuž	44
4.1.5.1	Čedičová vlákna	44
4.1.5.2	Polypropylenová vlákna	44
4.1.6	Složení betonů	45
4.2	II. etapa detekce vláken po tepelném zatížení	45
4.2.1	Metodika práce	45
4.2.2	Použité materiály	46
4.2.2.1	Polypropylenová vlákna	46
4.2.2.2	Celulózová vlákna	47
4.3	Výsledky I. etapy	47
4.3.1	Zkoušky čerstvého betonu	47
4.3.2	Zkoušky ztvrdlého betonu	48

4.3.2.1	Vlastnosti ztvrdlého betonu	48
4.3.2.2	Objemová hmotnost po teplotním zatížení.....	48
4.3.2.3	Pevnost betonů v tlaku po tepelném zatížení	49
4.3.2.4	Čedičová vlákna v tepelně namáhaném betonu.....	52
4.4	Výsledky II. etapy	53
4.4.1	Vizuální posouzení vláken.....	53
4.4.1.1	Čedičová vlákna	53
4.4.1.2	Polypropylenová vlákna PM 12/18	54
4.4.1.3	Polypropylenová vlákna PM 3/15	54
4.4.1.4	Polypropylenová vlákna Eurofibre HPR.....	55
4.4.1.5	Celulózová vlákna	56
5	Diskuze výsledků.....	57
5.1	I. Etapa	57
5.2	II. Etapa	58
6	Závěr	59
7	Seznam použité literatury	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	64
	SEZNAM TABULEK	67
	SEZNAM GRAFŮ	68

1 Úvod

Beton je universální stavební materiál s dobrou odolností vůči vlivům okolního prostředí. Je nehořlavý, při působení vysokých teplot podléhá degradaci. Vhodnou modifikací složení betonu a výběrem stupních složek lze odolnost betonu vůči působení vysokých teplot zvýšit. V teoretické části bakalářské práce je provedena rešerše literatury z oblasti chování betonů při působení vysokých teplot. Jsou zde uvedeny možnosti pro zvýšení odolnosti betonů vůči působení vysokých teplot. V experimentální části bakalářské práce jsou provedeny zkoušky na betonu s přídavkem polypropylenových a čedičových vláken a na betonu bez přídavku vláken. Zkušební tělesa jsou zatížena na teplotu 400 °C, 600 °C a 800 °C. A následně je zhodnocen vliv působení teploty na fyzikální vlastnosti betonů, na vzhled betonů, vliv přídavku vláken na vlastnosti betonů.

Na rozdíl od jiných konstrukčních materiálů beton nehoří. Je odolný vůči doutnajícím hmotám, které mohou dosáhnout velmi vysokých teplot a tak založit nebo dokonce opětovně způsobit požár. Beton nemůže být zapálený ani plameny z hořících předmětů. Jelikož beton nehoří, neprodukuje při požáru ani kouř, plyny nebo toxické zplodiny. Na rozdíl od některých plastů nebo kovů z betonu neodpadávají rozžhavené části, které jinak mohou být příčinou dalšího vznícení. Beton nezvyšuje požární zatížení.

Avšak při požáru ztrácí beton své mechanické vlastnosti jako je pevnost, únosnost apod. Proto se hledají možnosti, jak zvýšit odolnost betonu a betonových konstrukcí proti působení vysokých teplot. Jednou z možností je přidání vláken do betonové směsi. Vláknata polypropylenová se již velmi hojně využívají, v dnešní době se jeví jako slibné čedičová vlákna. Tato bakalářská práce se zabývá také ověřením vlivu čedičových vláken na vlastnosti betonu vystaveného vysokým teplotám.

2 Cíle práce

Cílem této práce je provést rešerši chování betonu při teplotním namáhání. Dle dříve zjištěných poznatků popsat volbu vhodných složek betonu, tak aby se zvýšila požární odolnost betonu. Zřetel je především kladen na přídavek vláknové výztuže. Zejména pak na čedičová vlákna. V experimentální části prozkoumat vliv teplotního zatížení na beton s vybranými složkami a rozptýlenou výztuží. Sledování změn vlastností betonu a chování vláknové výztuže při působení vysokých teplot.

3 Teoretická část

3.1 Základní pojmy a názvosloví v oblasti požáru

Zvýšená teplota

Teplota, která vyvodí v betonovém prvku dlouhodobě teplotu nejvýše 250 °C. [5]

Vyšší teplota

Teplota, který vyvodí v betonovém prvku dlouhodobě teplotu vyšší než 250 °C. [5]

Žhnutí

Vydávání světla bez plamenů, spojené s hořením materiálu. [6]

Požár

Pro účely požární ochrany se požárem rozumí každé nežádoucí hoření, při kterém došlo k usmrcení či zranění osob nebo zvířat, anebo ke škodám na materiálních hodnotách. Za požár se považuje i nežádoucí hoření, při kterém byly osoby, zvířata nebo materiální hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy. [7]

Lokální požár

Požár, kterého se účastní pouze omezená plocha požárního zatížení v požárním úseku. [3]

Návrhový požár

Pravděpodobný rozvoj a průběh požáru v požárním úseku nebo objektu, na který je dimenzováno požární zabezpečení požárního úseku nebo objektu; zahrnuje etapu rozvoje požáru (zpravidla od okamžiku tepelného výkonu 1 kW), etapu plně rozvinutého požáru (zpravidla od okamžiku, kdy se požár rozšíří po celé ploše místnosti, v několika místnostech či v celém požárním úseku, popř. kdy teploty v hořícím prostoru přesáhnou 500 °C až 600 °C) a etapu dohořívání – chladnutí (zpravidla od okamžiku, kdy teploty plynů v hořícím prostoru začnou klesat); výpočtové požární zatížení se vztahuje ke druhé etapě požáru; druhá etapa požáru se může projevat zónově i v jednom požárním úseku. [7]

Plně rozvinutý požár

Stav požáru, kdy na všech hořlavých materiálech v posuzovaném prostoru probíhá hoření. [3]

Zdokonalený model požáru

Návrhový požár, který vychází z principu zachování hmoty a energie. [3]

Tepelná zatížení

Zatížení konstrukce vyjádřená čistým tepelným tokem na prvky. [3]

Požární zatížení

Součet tepelné energie uvolňované hořením všech hořlavých materiálů v prostoru (obsah budovy a prvky konstrukce). [3]

Požární scénář

Kvalitativní vyjádření průběhu požáru v čase, udávající klíčové události, které charakterizují požár a odlišují jej od jiných možných požárů. Obvykle definuje vznícení a průběh rozvoje požáru, plně rozvinuté stádium dohořívání, spolu s prostředím v budově a zařízením, které mají vliv na průběh požáru. [3]

Křivka vnějšího požáru

Nominální teplotní křivka, určená pro vnější stranu dělicích vnějších stěn, které mohou být vystaveny účinkům požáru z různých částí fasády, tzn. Přímo z vnitřku příslušného požárního úseku, nebo z úseku ležícího pod nebo sousedícího s příslušnou vnější stranou. [3]

Křivka uhlovodíkového požáru

Nominální teplotní křivka pro vyjádření účinků požáru uhlovodíkového druhu. [3]

Normová teplotní křivka

Nominální křivka definovaná v EN 13501-2 pro vyjádření modelu plně rozvinutého požáru v úseku. [3]

Ekvivalentní doba vystavení účinkům požáru

Doba působení požáru podle normové teplotní křivky, která má podle předpokladu stejný tepelný účinek jako skutečný požár v požárním úseku. [3]

Požární nebezpečí

Požárním nebezpečím se rozumí pravděpodobnost vzniku požáru nebo výbuchu s následným požárem. [1]

Požární riziko

Rozsah a intenzita případného požáru v posuzovaném stavebním objektu nebo jeho části; je určena výpočtovým požárním zatížením. [7]

Normová požární odolnost

Schopnost konstrukce nebo její části (obvykle pouze prvků) plnit požadované funkce (nosnou, nebo dělící funkci) při vystavení teple podle normové teplotní křivky, při stanovené kombinaci zatížení a po stanovenou dobu. [3]

Požární bezpečnost

Požární bezpečností se rozumí souhrn organizačních stavebních a technických opatření k zabránění vzniku požáru nebo výbuchu s následným požárem k ochraně osob, zvířat a majetku v případě vzniku požáru a k zamezení jeho šíření. [1]

Požární bezpečnost stavebních objektů

Schopnost stavebních objektů bránit, v případě požáru, ztrátám na životech a zdraví osob, popř. zvířat a ztrátám na majetku. Dosahuje se jí vhodným urbanistickým začleněním objektu, jeho dispozičním, konstrukčním a materiálovým řešením nebo požárně bezpečnostními zařízeními a opatřeními. [7]

Požární bezpečnost staveb se sleduje na úrovni územního plánování, při projektování a provádění stavby a během užívání stavby. Souvisí se zákonem o požární ochraně č. 133/1985 Sb, dle kterého definuje preventivní opatření k:

- Zabránění vzniku požáru
- Zamezení rozšíření požáru
- Zabezpečení evakuace osob a materiálu [2]

Požární úsek

Prostor v budově, sahající přes jedno nebo více podlaží, uzavřený požárně dělícími prvky tak, že je po příslušnou dobu zabráněno šíření požáru mimo tento požární úsek. [3]

Požární stěna

Požární stěna je stěna oddělující dva prostory (obecně dvě pozemní stavby), která je navržena s takovou požární odolností a stabilitou konstrukce, případně i odolností vůči vodorovnému zatížení, aby v případě požáru a porušení konstrukce na jedné straně stěny bylo zabráněno šíření požáru za tuto stěnu. [2]

Ochranné vrstvy

Materiál nebo kombinace materiálů nanášených na nosný prvek pro zvýšení jeho požární odolnosti. [2]

Odprýskávání betonu

Oddělování vrstev nebo jednotlivých částí betonu z povrchu konstrukčního prvku při vystavení vysokým a rychle rostoucím teplotám. [4]

Kritická teplota výztuže

teplota výztuže, při které se očekává porušení prvku při požární situaci (kritérium R) při dané úrovni napětí v oceli. [2]

Kritická teplota oceli má hodnotu $\theta = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$, u předpínací výztuže se předpokládá kritická teplota pro pruty $\theta = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro dráty a lana $\theta = 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [2]

Součinitel hoření

Součinitel hoření představuje účinnost hoření a nabývá hodnot 1 při úplném shoření a pro hodnotu 0 při úplném zabránění hoření. [3]

3.2 Chování betonu při působení vysokých teplot

3.3 Vliv vysokých teplot a ohně na běžné cementové betony

Zájem o pochopení procesů probíhajících v betonu při jeho vystavení vysokým teplotám pramení zejména ze stále vyššího rizika vzniku požáru ve výškových budovách a tunelech. Během těchto požárů může dosáhnout teplota až 1100 °C u budov a 1350 °C v tunelech. Což vede k možným poruchám betonových konstrukcí [37]. Avšak nejen při takto vysokých teplotách může dojít k porušení betonové konstrukce. K explozivnímu porušení betonu dochází v intervalu teplot 100 – 300 °C, čímž je velmi ohrožena únosnost betonové konstrukce. Na druhou stranu je beton považován za materiál, který si zachovává své vlastnosti při působení vysokých teplot. Díky nízkému koeficientu tepelné vodivosti, zhruba $1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, teplo prochází konstrukcí pomalu, čímž je ochráněna výztuž náchylná na působení vysokých teplot. Vzhledem k tomuto jevu se po průřezu konstrukce, která je vystavena působení vysokých teplot, objevují značné teplotní gradienty, které jsou zdrojem dalšího porušení betonové konstrukce. [8]

Při posuzování vlivu vysokých teplot působících na beton je potřeba se na beton dívat komplexně. Změny, které probíhají v betonu, jsou totiž jak mechanické, tak i chemické. Vlivem teplotních gradientů, zde dochází taky k migraci plynů a kapalin obsažených v betonu.

Změny vlastností betonu, které nastanou vlivem působení vysokých teplot, jsou odvislé od fyzikálních, teplotních a mechanických vlastností betonu. Jak bylo dokázáno [37] změny pevnosti betonu jsou závislé na několika faktorech, jako jsou volba vhodného druhu kameniva, cementu, poměr množství voda/cement, použití přísad a jiné. Dalším faktorem je intenzita žáru a doba působení.

Stoupající teplota má za následek odpařování vody, dehydrataci C-S-H gelu a rozpad $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a dalších minerálů. Spolu s těmito změnami dochází, spolu se zvyšující se teplotou ke změnám v kamenivu. Všechny tyto změny mají za následek rapidní pokles pevností a modulu pružnosti betonu. Při dosažení teploty 500 °C bývá pokles pevností až 60 %, při těchto hodnotách je beton považován za hodně porušený.



Obrázek č. 1 – Povrch betonu vystaven teplotě 600 °C a) s vápenatým kamenivem b) s křemičito vápenatým kamenivem [8]

Tabulka č. 1 - Přehled změn v mikrostruktuře betonu při zahřívání [8]

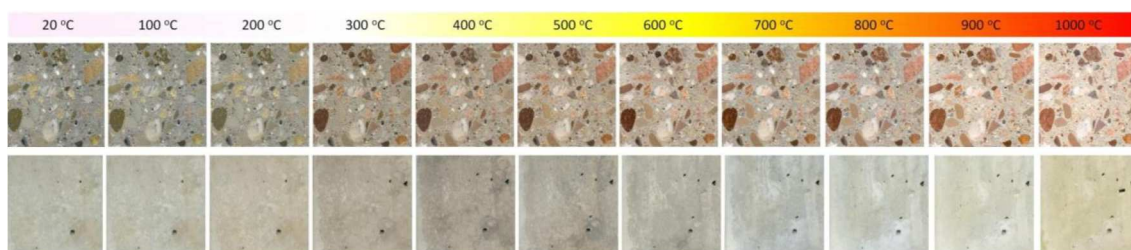
Rozsah teplot	Změny v mikrostruktuře betonu
20 – 200 °C	<p>Pomalá ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti.</p> <p>80 °C – 150 °C dehydratace ettringitu</p> <p>150 °C – 170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$</p> <p>Počátek dehydratace CSH gelu.</p> <p>Ztráta fyzikálně vázané vody.</p>
300 – 400 °C	<p>Praskání křemičitého kameniva (350 °C).</p> <p>Kritická teplota pro vodu (374 °C) – poté už není možná přítomnost volné vody.</p>
400 – 500 °C	Rozklad portlanditu – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
500 – 600 °C	Přeměna křemene z fáze β na α (573 °C) v kamenivu a písku.
600 – 800 °C	Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta\text{-C}_2\text{S}$.
800 – 1 000 °C	<p>840 °C – rozklad dolomitického vápence</p> <p>930 °C – 960 °C – rozklad kalcitu – $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$</p>
1 000 – 1 200 °C	<p>Tvorba Wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)</p> <p>1 050 °C – tavení čediče</p>
1 300 °C	Celkový rozklad betonu

3.3.1 Změny vlastností betonu vystaveného působení vysokých teplot

3.3.1.1 Změna barvy betonu

Betony obsahující kamenivo s obsahem křemene se při vystavení teplotám mezi 300 °C až 600 °C zbarví do červena, mezi 600 °C a 900 °C do šedo-bíla a nad teploty 900 °C opět do šedé barvy. Na tento efekt má největší vliv dehydratace, která v betonu nastane. Spolu se změnami, které se vyskytují u kameniva [38].

U kameniva obsahujícího vápenec dojde při zahřátí ke změně barvy na bělavou.



Obrázek č. 2 – Barevné změny zahřívání betonu s odhaleným kamenivem a s běžným povrchem, pevnost betonu 97 MPa [8]

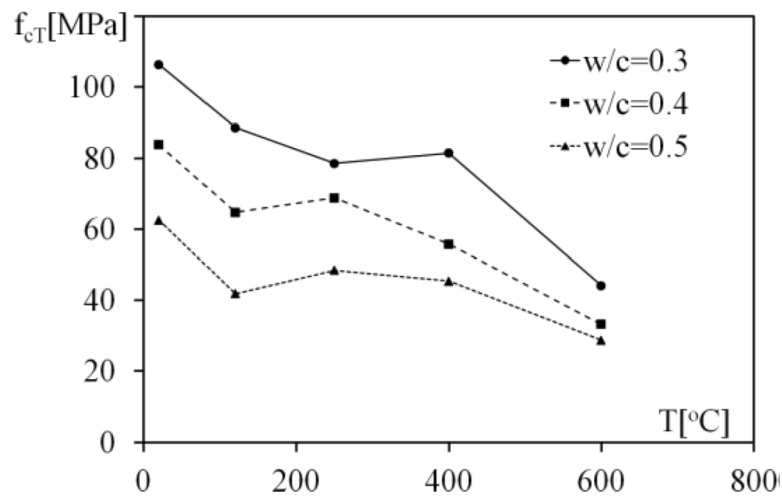
K analýze barevných změn betonu může být přístupováno dvěma směry. Jedním je pozorování změn na povrchu betonu a druhá možnost je sledování změn barev při odhaleném kamenivu. Na základě porovnávání barevných změn povrchu betonu, který prošel termálním zatížením je založena zkouška, která nám pomáhá určit teploty, kterým byl beton vystaven. [8]

3.3.1.2 Změna pevnosti v tlaku

Změny mechanických pevností, které probíhají při zahřívání, jsou výsledkem změn, které v betonu proběhnou. Tyto změny jsou závislé na fyzikálně-chemických vlastnostech materiálu, na maximální působící teplotě, době působení, zatížení, obsah vlhkosti apod.

Samotný způsob zkoušení betonu je také důležitým faktorem, který je potřeba vzít v úvahu. Nejběžnější způsob je vystavení vzorku působení vysokých teplot, poté ho nechat zchladit na pokojovou teplotu a následně otestovat. Tento způsob nám však dává výsledky vlastností po teplotním zatížení, nikoliv při něm. Pro zjištění chování betonu je vhodnější zkoumat vlastnosti během působení vysokých teplot. Během chlazení může u betonu dojít k vytvoření dodatečných trhlin, které následně sníží pevnost betonu.

Během zahřívání betonu na teplotu 120 °C pozorujeme pokles pevností zhruba o 30 % vlivem dehydratace C-S-H gelu a snížení Van der Waalsových sil. Při dalším zvyšování teploty na 250 °C můžeme pozorovat navýšení tlakových pevností oproti těm při teplotě 120 °C. Toto zvýšení pevností je opožděno u betonů s nižší vodním součinitelem ($w/c=0,3$). Tento jev může být vysvětlen opětovnou hydratací, která nastala díky zvýšené teplotě a tlaku. Nebo též díky vysušení vzorku. V dalších fázích při teplotách nad 250 °C už vidíme rapidní pokles tlakových pevností betonu.[8]



Obrázek č. 3 – Změny pevností v tlaku v závislosti na teplotě pro betony s různými vodními součiniteli [8]

3.3.2 Explozivní odprýskávání

Odprýskávání betonu při požáru má různé formy: odprýskávání kameniva, povrchu, rohů, olupování betonu při požáru i po hašení. Každá forma má svůj vlastní mechanismus a u některých forem se jednotlivé mechanismy překrývají. Odprýskávání při pórovém tlaku vzniká v důsledku nárůstu tlaků páry v horkém betonu. Klíčovou roli hrají propustnost betonu, počáteční úroveň saturace zbytkovou vodou, poměr tepla a pevnosti betonu v tahu a velikost průřezu. Odprýskávání v důsledku napětí od změny teploty souvisí s tepelnou roztažností betonu, kameniva, úrovní aplikovaného zatížení, poměru tepla a pevnosti betonu v tahu. V horkém betonu se vytváří teplotní gradienty, které způsobují napětí v tlaku v blízkosti zahřívajícího povrchu (vlivem omezení deformace) a napětí v tahu v chladnějších spodních vrstvách. Odprýskávání v důsledku napětí od změny teploty se

může projevit i v suchém betonu. Explosivní odprýskávání betonu při požáru je často kombinací pórového tlaku, tlaku v oblasti betonového povrchu vystaveného teplotnímu namáhání a vznikajících vnitřních trhlin. Trhliny se tvoří paralelně s povrchem, pokud je součet napětí větší než pevnost materiálu v tahu. To je doprovázeno náhlým uvolněním energie a prudkým zhroucením části rozžhaveného povrchu.

3.4 Složky betonu při působení vysokých teplot

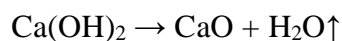
3.4.1 Cementový tmel při působení vysokých teplot

Zahřívání cementové pasty vede k jejímu vysušování. Voda se postupně začne odpařovat z materiálu. Pořadí, ve kterém se voda odpařuje, závisí na velikosti energie, která váže vodu a pevnou látku. Tím pádem volná voda odchází první, následuje kapilární voda a nakonec fyzikálně vázaná voda. Proces odpařování vody, která je chemicky vázaná na cementové hydráty, přichází jako poslední. Mechanické vlastnosti cementové pasty jsou silně ovlivněny chemickými vazbami a kohezními silami mezi lístečky C-S-H gelu. Předpokládá se, že téměř 50 % [8] pevnosti cementové pasty pochází z kohezních sil mezi lístečky, proto odpařování vody z prostoru mezi lístečky silně ovlivňuje mechanické vlastnosti.[8]

Při této dehydrataci C-S-H gelu dochází ke zmenšení jeho objemu, což vede ke zvýšení pórovitosti cementové pasty.

Nicméně pokud je cementová pasta zahřívána za vlhkých podmínek a v uzavřeném, prostředí může dojít k tzv. hydrotémalním reakcím. Tento jev je nazývá vnitřní autoklávování. V těchto podmínkách a při těchto procesech dochází k významným chemickým a fyzikálním změnám. Tyto procesy mohou aktivovat změny v mikrostruktuře hydrátů a dočasně zvýšit pevnost cementového pasty. Celý tento proces je dobře známa technologie při prefabrikaci a výrobě pěno a plynosilikátů.

Během zahřívání cementové pasty dochází nejdříve k rozkladu etringitu a to už dříve než dosáhne teplota 100 °C. Dehydratace C-S-H gelu je výrazná a probíhá od samého začátku ohřívání cementové pasty. Je nutno poznamenat, že struktura cementové pasty je částečně poškozena dehydratací při teplotě 105 °C, což je teplota, která je považována za teplotu sušení materiálů. Pokud zahřívání pokračuje přibližně na teplotu 500-550 °C obsah portlanditu rapidně klesne vlivem jeho rozpadu dle následující rovnice:



Tento rozklad portlanditu nám vysvětluje zvýšený obsah CaO při zkoušení při teplotách okolo 550 °C. Při teplotách nad 650 °C nastává rozklad CaCO₃, který vzniká karbonatací složek cementového tmelu. K rozkladu dehydratovaného C-S-H gelu dochází při teplotách vyšších než 800 °C. Hlavními složkami cementového tmelu, který byl vystaven teplotě nad 800 °C, jsou CaO, wollastonit, brownmillerit a gehlenit. [30]

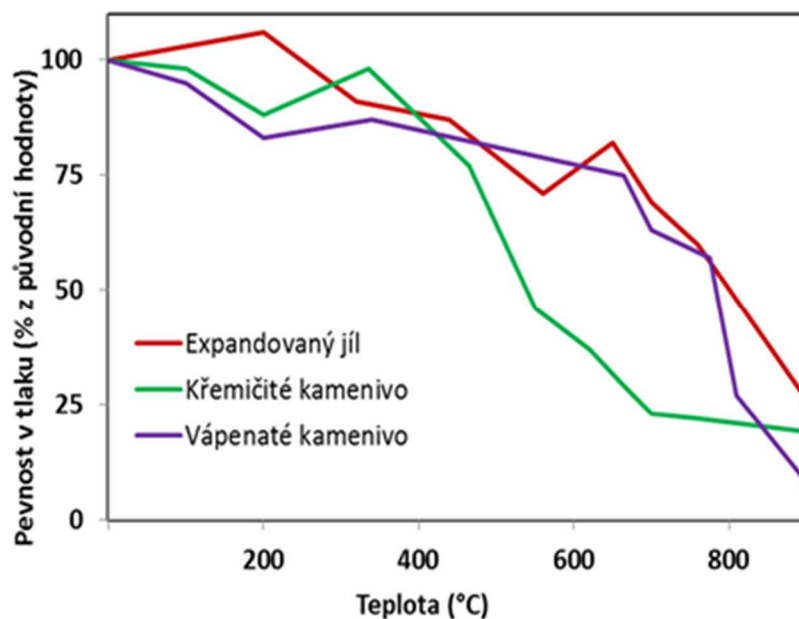
3.4.2 Kamenivo při působení vysokých teplot

Kamenivo zaujímá v betonu zhruba 70-80 % objemu a tím může výrazně ovlivnit jeho chování a odolnost vůči působení vysokých teplot. Každé kamenivo se při působení vysokých teplot chová rozdílně a je doprovázeno chemicko-fyzikálními změnami. Proto je výběr vhodného kameniva důležitým faktorem při navrhování betonu. K popisu chování jednotlivých kameniv při vystavení vysokých teplot se používá termín „tepelná stabilita kameniva“ [8]. Termálně stabilní kameniva se vyznačují chemickou a fyzikální stabilitou při působení vysokých teplot. Při výběru kameniva by bylo nejvhodnější zvolit kamenivo s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti a zanedbatelným zbytkovým přetvořením. [8]

Teplotní roztažnost kameniva je dána jeho mineralogickým složením. Dalším důležitým faktorem, který je potřeba brát v úvahu jsou metamorfnní přeměny kameniva. Nejvýrazněji tuto změnu pozorujeme u kameniva s obsahem křemene. Při zahřívání kameniva s obsahem křemene dochází při teplotě 574 °C k vratné přeměně β – křemene na α – křemen, jež je doprovázena objemovým nárůstem.

Při zahřívání vápencového kameniva 700 °C dochází k rozkladu kameniva na CaO a CO₂. A obsažené formy CaO mohou následně při ochlazování hydratovat s objemovým nárůstem až 44 %. [25]

Z hlediska požární odolnosti je vápenaté kamenivo výhodnější než kamenivo s obsahem křemene, pokud je teplota požáru nižší, než 750 °C. tento výsledek je připisován faktu, že při endotermickém rozkladu vápenatého kameniva je zapotřebí vyšší množství tepla.



Obrázek č. 4 - Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku způsobené zvýšením teploty [25]

Kamenivo složené z více minerálů jsou náchylnější k rozpadu, který je způsoben rozdílností koeficientů teplotní roztažnosti. Teplotní namáhání způsobuje napětí mezi krystaly a následné selhání. Pokračující zahřívání vede k roztavení minerálů. Teplota tání se opět liší podle druhu obsaženého minerálu. Pro žulu se teplota tání pohybuje mezi teplotami 1210-1250 °C, zatímco u například u čediče je to 1050 °C, jehož tavení je doprovázeno expanzí a uvolňováním plynu.

Tabulka č. 2 - Lineární tepelné roztažnosti pro různé typy hornin [31]

Typ horniny	Koeficient lineární tepelné roztažnosti [10 ⁻⁶ /°C]
Žula	1,8 – 11,9
Čedič	3,6 – 9,7
Pískovec	4,3 – 13,9
Vápenec	0,9 – 12,2
Dolomit	6,7 – 8,6

3.4.3 Spolupůsobení cementového tmele a kameniva při působení vysokých teplot

Zvyšující se teplota způsobuje nárůst objemu u kameniva a zmenšení objemu cementové pasty, která jej obklopuje. V důsledku toho je vazba pasta- kamenivo nejslabším místem

v betonu vystavenému zvyšujícím se teplotám. Do značné míry je poškození betonu způsobeno přítomností trhlin způsobených rozdílnými teplotními součiniteli kameniva a cementové pasty. Na obrázku vidíme beton poškozen vlivem působení vysokých teplot. Beton je složen z čedičového kameniva a byl vystaven teplotě 800 °C. Pozorujeme zde trhliny, jak v cementové pastě, tak v tranzitní zóně.



Obrázek č. 5 - Struktura betonu zahřátá na 800 °C, beton složený z čedičového kameniva, foto autor

3.4.4 Ocelová výztuž při působení vysokých teplot

Jednou z možností jak zlepšit požární odolnost betonů je vhodná volba krycí vrstvy betonu a její provedení. Je nezbytné, abychom udrželi teplotu výztuže pod 500 °C[2], Při této teplotě je snížena hodnota meze kluzu až na 50% hodnotu. Vznik jakýchkoliv trhlinek a nedokonalostí v krycí vrstvě může vést k vytvoření prostupu pro teplo v případě vzniku požáru. Díky těmto prostupům může teplo proniknout k ocelové výztuži a zvýšit její teplotu až na kritických 500 °C. Pokud dojde k překročení pevnosti spojení mezi ocelovou výztuží a betonem, které vznikne teplotním gradientem mezi betonem a ocelovou výztuží, následuje odtržení betonové krycí vrstvy a odhalení ocelové výztuže.

Pokud nastane takovéto odhalení výztuže, dochází k rychlé degradaci oceli a potažmo i betonu. Vlivem postupně zvyšující se teploty, která působí na odhalenou výztuž, ztrácí výztuž své mechanické vlastnosti.

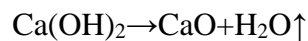
Při teplotě do 400 °C je pevnost oceli nezměněna. Pokud teplota stoupne na rozmezí 450 – 650 °C začnou se projevovat prvotní změny oceli, především duktilita a tažnost. Od teploty 750 °C dochází k rekrystalizaci a ztráty pevnosti. A od teplot 900 °C dochází k tečení oceli. [25]

3.5 Modifikace betonové směsi pro zlepšení požární odolnosti

3.6 Pojivo

Co se týče portlandského cementu, jedná se o jednu z nejméně vhodných možností při užití do betonu pro zvýšenou teplotní odolnost. Při hydrataci portlandského slínku vzniká portlandit - Ca(OH)_2 , u kterého dochází při zvýšené teplotě ke ztrátě vody. Objemový úbytek činí zhruba 1 %.

Portlandit se při teplotě 500 °C rozpadá podle rovnice



Avšak při hašení konstrukce je betonu opět dodávána voda a dochází k ochlazení. Při tomto procesu dochází k opětovnému hašení vápna, které je spojeno s nárůstem objemu. Proto je pro zlepšení požární odolnosti betonu vhodnější použít cement s co nejnižším obsahem portlandského slínku. Tedy cementu s nejrůznějšími příměsi ať už popílku, strusky nebo mikromletého vápence. [25]

3.7 Plnivo

Co se týče běžných cementových betonů, je nejdůležitějším faktorem, který může ovlivnit odolnost teplotně zatěžovaného betonu, typ použitého kameniva. Jsou známá rozdílná schémata chování kameniva různého mineralogického složení při teplotním zatěžování. Otázkou zůstává reálné chování kameniva v cementovém kompozitu při použití různých zatěžovacích křivek. Vedle vlastností samotného kameniva jako tepelná roztažnost hraje roli také tvar zrna kameniva a další specifické vlastnosti. Z hlediska objemových stálostí a zachování vlastnosti se nám lépe jeví kamenivo vápenaté. Což je méně využívané kamenivo pro výrobu betonů, než-li kamenivo křemičité. Nižší odolnost křemičitého kameniva je způsobena přeměnou β -křemene na α -křemen, při teplotě 574 °C. Tato přeměna je doprovázena velkými objemovými změnami. Čímž dojde k narušení struktury a snížení pevnosti betonu až o 80 % [4]. Tato přeměna je navíc vratná, tudíž při chlazení

betonu dojde k opětovné změně, tentokrát z modifikace α na modifikaci β , opět doprovázenou objemovou změnou. Vápenaté kamenivo je na rozdíl od křemičitého stabilnější. K rozpadu kameniva dochází až při 800 °C. Zároveň je tato reakce endotermická, tudíž teplo z požáru pohlcuje. [25]

Další kapitolou jsou lehké betony potažmo lehká kameniva. Lehká kameniva se převážně vyrábí výpalem jílu, při kterém dojde k jejich expanzi a vytvoření pórové struktury, která pomáhá zlepšit tepelně izolační vlastnosti. Tento fakt přispívá k ochraně jak betonu jako celku, tak výztuže betonu, která by jinak ztratila své vlastnosti již při 450 °C. Zároveň je lehké kamenivo velice stabilní při vystavení vysokým teplotám. Kamenivo zůstává stabilní až do teplot 1050 °C. Lehké kamenivo má tedy vhodné vlastnosti pro zvýšení požární odolnosti, avšak díky se vysoké pórovitosti má tendenci ke zvýšené nasákavosti. Voda, která je obsažena v kamenivu, může při odpařování zapříčinit explozivní odprýskávání.

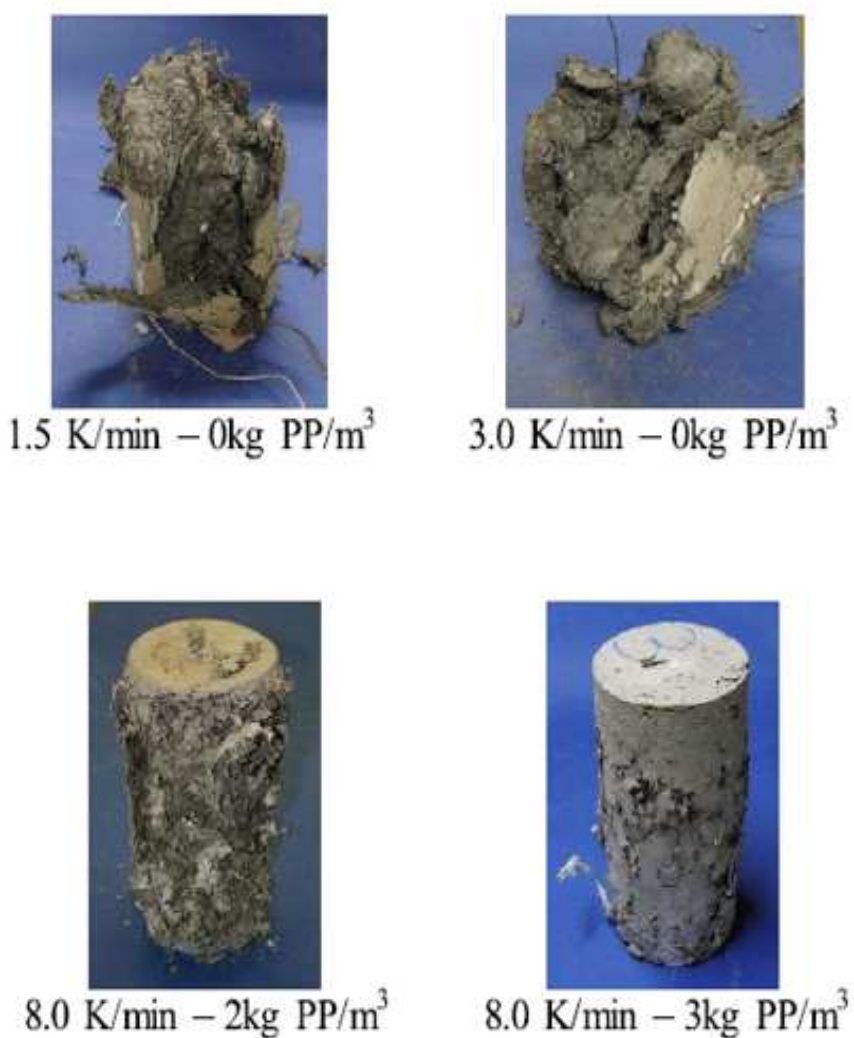
3.8 Příměsi

3.8.1 Polypropylenová vlákna

Všechny složky cementového betonu mají vliv na odolnost vůči působení vysokých teplot, především pak pojivová složka. U tohoto komponentu cementového betonu však není výrazná možnost výběru, příp. modifikace ku prospěchu zvýšení odolnosti cementového kompozitu vůči vysokým teplotám.

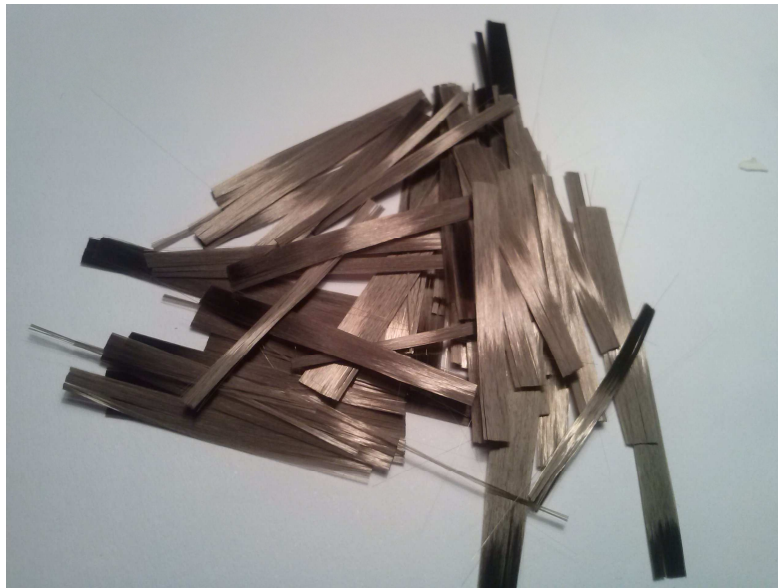
Betony a zejména vysokohodnotné mají tendenci k explozivnímu odprýskávání, když dojde k požáru. Pro zabránění vzniku odprýskávání je potřeba dodat adekvátní tepelnou bariéru, či přidat do čerstvého betonu PP vlákna. Z důvodu vysokých cen termálních bariér a nedostatku zkušeností je možnost přidání PP vláken do čerstvého betonu jedna z nejpoužívanějších metod ochrany vysokohodnotných betonů proti odprýskávání. Minimální množství PP vláken pro beton C80/95 stanoveno na 2 kg/m³. Je však diskutabilní, zda větší množství PP vláken je vhodné pro zvýšení odolnosti proti odprýskávání. Několik výzkumů se zaměřilo na výběr nejvhodnějších vláken pro zabránění odprýskávání[32]. Studie se zabývala materiálem vláken včetně jejich geometrie. Z výsledků se dá soudit, že užší a delší vlákna jsou vhodnější, než přidání většího množství běžných vláken[32]. Potřebné zvýšení pórového objemu a nejvhodnější průměr vláken zabraňující odprýskávání, zatím nebyl přesně stanoven.

Vysoký pórový tlak, který převyšuje hodnotu pevnosti betonu v tahu, je hlavním důvodem výskytu explozivního odprýskávání betonu při vysokých teplotách[49]. Díky roztavení PP vláken při teplotách vyšších jak 160 °C se může vzrůstající tlak uvolnit do nově vzniklých pórů. [39]



Obrázek č. 6 – Vliv přídavku PP vláken na odolnost betonu proti vysokým teplotám [39]

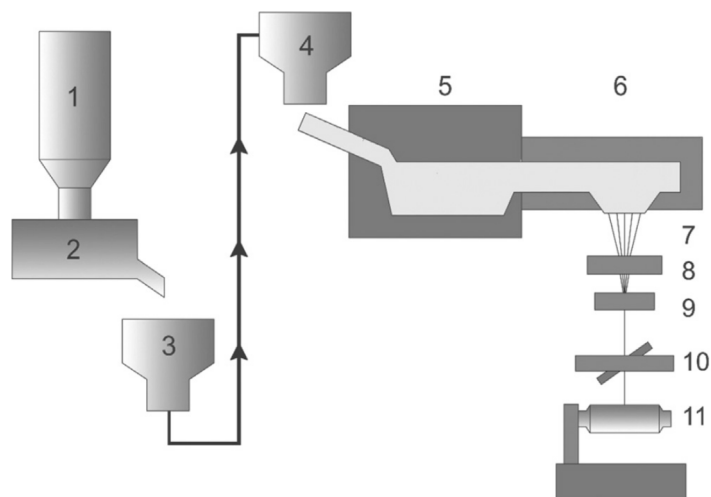
3.8.2 Čedičová vlákna



Obrázek č. 7 – Čedičová vlákna foto autor

Čedič je přírodní materiál, který se nachází ve vulkanických horninách s teplotou tání 1500-1700 °C. Jeho vlastností jsou závislé na teplotě při, které vznikl. V závislosti na teplotě a chladnutí čediče nastala více či méně dokonalá krystalizace. Hlavní složky čediče jsou SiO_2 a Al_2O_3 . [34,35]

Základní vlastnosti čedičových vláken se odvíjí od vlastností základního materiálu. Výroba čedičových vláken je velmi podobná výrobě skleněných vláken a však s menší spotřebou tepla a bez nutnosti přídavku aditiv. Vlákná jsou vyráběna roztavením čediče při teplotách 1450-1500 °C. Následně se takto roztavený materiál rozfoukává na jednotlivá vlákna. Takto vytvořená vlákna se mohou řezat na požadovanou délku.



Obrázek č. 8 – Zjednodušené schéma výroby čedičových vláken:1) zásobník rozdrčeného čediče 2) plnicí zařízení 3) transport materiálu 4) dávkovač 5) primární tavící zóna 6) sekundární tavící zóna 7) pouzdro tvořící vlákna 8) tvorba vláken 9) tvarování vlákna 10) napínání vlákna 11) automatický navíječ vlákna [41]

Tabulka č. 3 - Složení čedičových vláken [56]

Složka	Čedičové vlákno (% hmot.)
SiO₂	9 - 12
Al₂O₃	17,2
CaO	8,6
MgO	5,2
Fe₂O₃	< 5
Na₂O	< 5
K₂O, TiO₂	< 1
Cr₂O₃ , CoO, NiO	< 0,1

Takto vyrobená vlákna neobsahují žádná aditiva, škodlivé látky. Jsou odolné vůči působení chemikálii, vysokých teplot a jsou nezávadná pro životní prostředí. Obzvláště jejich odolností proti působení vysokých teplot se v posledních letech značně využívá a zkoumá.

Čedičová vlákna byla v poslední době využívána pro výrobu vysokopevnostních betonů. Díky jejich vlastnostem se může jednat o náhradu oproti typickým druhům rozptýlené výztuže (skleněná, polypropylenová). Jednou z hlavních výhod čedičových vláken je jejich vysoká odolnost proti působení teplot. Teplotní rozptyl použití je od -200 až do 800 °C. Teplotní odolnost vláken závisí na složení materiálu pro výrobu a obsahu mikropórů, které zabraňují přenosu tepla. Díky těmto vlastnostem je možnost využívat čedičové vlákna také jako tepelnou izolaci. [41] Termální gravimetrická analýza provedená Hao a Yu [36] prokázala, že u obou vláken jak čedičových, tak skelných dochází k úbytku hmotnosti v intervalu 200-350 °C. Avšak ze zkoušky vyplynula lepší tepelná stabilita čedičových vláken oproti skelným vláknům.[55]

Avšak pro plné využití čedičových vláken ve stavebnictví je potřeba provést další zkoušky a měření pro porozumění chování těchto vláken v betonu.

3.8.2.1 Využití čedičových vláken

- plná náhrada skleněných vláken při výrobě tkaniny v perlinkové vazbě pro stavebnictví (omítkové systémy, zalévací hmoty)[56]
- geotextilie, armovací tkaniny a vlákna (silniční a železniční stavitelství, živičné povrchy vozovek, lepenky, betonových výrobků) [56]
- tepelně-izolační směsi ve stavebnictví pro žáruvzdorné stavební hmoty, plniva do tmelů apod. [56]
- výztužné tkaniny v kompozitech a sekaná vlákna v plastických hmotách, v různých technických výrobcích (rozbrušovací kotouče, lamináty, brzdové destičky) [56]
- izolace tepelné, zvukové a chemické (stavebnictví, letecký průmysl, elektrárny, automobily) [56]
- filtrování agresivních látek, tkaniny a ucpávkové šňůry v chemickém průmyslu (náhrada azbestopryžových výrobků), horkovzdušná filtrace[56]
- ochranné žáruvzdorné a kyselinovzdorné pracovní oděvy do provozů s velkou tepelnou zátěží a s agresivním chemickým prostředím (tkaniny s hliníkovou fólií v hutích, ocelárnách, pro hasiče a svářeče, v chemických provozech, galvanovnách) [56]

- bytové a interiérové nehořlavé textilie (tapety, podkladové textilie) [56].
- Výroba vodovodní a kanalizačních trubek

3.8.2.2 Vybrané druhy výrobků z čedičových vláken



Obrázek č. 10 – Nekonečná vlákna [56]



Obrázek č. 9 – Tkaná síťovina [56]



Obrázek č. 12 – Tkanina [56]



Obrázek č. 11 – Tkaná izolace [56]

3.8.2.3 Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken

Tabulka č. 4 - Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [56]

	Čedič	Sklo
Hustota (při 20°C) [kg.m⁻³]	2 900	2 6000
Navlhavost [%]	0,5	0,1
Modul pružnosti v tahu [MPa]	100 000	70 000
Pevnost v tahu [MPa]	1 850 až 2 150	1 850 až 2 150
Pevnost v tlaku [MPa]	300	300
Změna pevnosti v tahu v [%]		
Při relativní vlhkosti 100% za 64 dny	91	72
Při teplotě 400 °C	82	52
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod.		
v H₂O [%]	99,8	99,3
v HCl [%]	81,8	53,9
Pracovní teplota [°C]	-200 až +700	-60 až +460
Měrná tepelná vodivost [W.m⁻¹.K⁻¹]	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035
Specifický odpor [Ω.m]	10 ¹²	10 ¹¹

3.8.2.4 Vliv přídavku čedičových vláken na odolnost proti působení vysokých teplot

Dosavadní výzkum se zaměřoval na zlepšení vlastností ztvrdlého betonu, Li a Su [50,51] dokázali, že přidání čedičového vlákna může výrazně zlepšit deformace a houževnatost geopolymerního betonu. Jiang a kolektiv [51] dokázal, že přidání čedičových vláken výrazně snižuje smrštění cementové malty zejména v raných stádiích. Také došlo, po přídavku vláken, ke zlepšení pevností v tahu ohybem u malt v raných fázích hydratace.

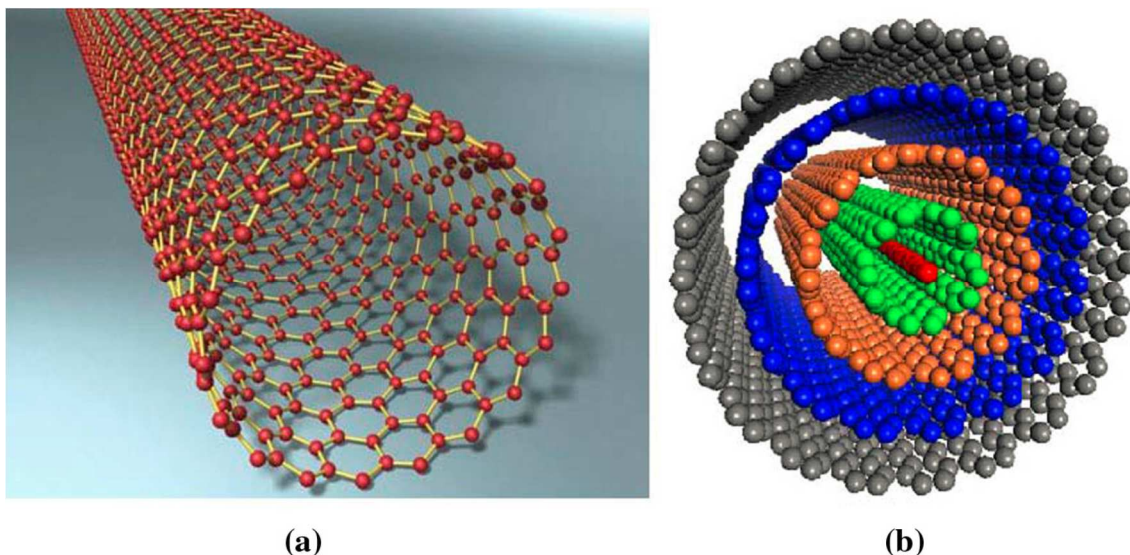
V poslední době se zkoušení zaměřuje také na odolnost betonů s příměsí čedičových vláken proti působení vysokých teplot. Výzkum prokázal pozitivní dopad vláken na odolnost betonu při vystavení teplotám do 400 °C. Při těchto teplotách, kdy dochází k dehydrataci C-S-H gelu a rozkladu Ca(OH)₂ bylo pozorováno navýšení pevností až o 20 % oproti betonu bez přídavku vláken. Ovšem při zatížení betonu na teploty vyšší, 800 °C, už byl rozklad cementového tmele tak velký, že čedičová vlákna nebyla schopná napomoci zvýšení pevností.

Po provedení několika experimentů bylo zjištěno zhoršení zpracovatelnosti čerstvého betonu s přídavkem čedičových vláken. Důvodem byla voda adsorbovaná na povrchu vláken. Tento problém lze však jednoduše vyřešit přídavkem superplastifikačních přísad. Co se týče pevnosti v tahu ohybem, čedičová vlákna mají na tuto vlastnost pozitivní vliv. Po přídavku vláken se pevnost v tahu ohybem zvýšila zhruba o 5 % oproti betonu bez přídavku vláken. Čedičová vlákna dokážou výrazně zlepšit dlouhodobější pevnosti v tlaku. A vlákna se zdají mít velmi pozitivní dopad na betony vystavené vyšším teplotám, přesněji do 400 °C. Další výhodou je menší objem vláken v betonu.

Čedičová vlákna mohou být považována za ekologický, bezpečný materiál. Nejedná se o nový materiál, avšak jeho použití nebylo nikterak značné. V poslední době dochází k velkému rozšíření oblasti použití od stavebnictví přes automobilismus až po letectví. Výroba čedičových vláken je velmi podobná výrobě skelných vláken, avšak nevyžaduje žádná aditiva a nespotebovává se tolik energie. Což má kladný dopad na životní prostředí. Cena čedičových vláken je odvislá od vlastností základního materiálu, z čehož plyne i velká rozmanitost vláken a jejich vlastností. Díky vlastnostem, které mají v kompozitních materiálech, mají slibnou budoucnost ve všech výše zmíněných odvětvích.

3.8.3 Uhlíkové nanočástice

Obyčejný beton má nízkou pevnost v tahu ohybem, je velmi křehký a podléhá nekontrolovatelnému šíření trhlin. K překonání těchto nevýhod byl v poslední době představen koncept přídavku materiálu s rozměry v řádu nanomilimetrů. Materiály s rozměry od milimetrů po micrometry jsou již delší dobu využívány. Jsou to především – ocelová vlákna, skleněná vlákna, azbestová vlákna, polymerní vlákna apod. Každý z těchto materiálů má své výhody i nevýhody avšak díky jejich rozměrům postačují pouze na zabránění šíření mikrotrhlin, nikoliv nanotrhlínek ve struktuře betonu. K řešení těchto problémů mohou přispět nano materiály, které jsou v současné době podrobeny pozorování.



Obrázek č. 13 – Schéma SCNT (a) a MCNT (b) [45]

Jako výhodný materiál se jeví CNT – Carbon nanotubes, materiál ve tvaru válce, jehož plášť je tvořen vrstvou o tloušťce jednoho atomu. Jedná se o alotrop uhlíku. Nejčastěji se CNT dělí na single wall a multi walled carbon nanotubes.

Od roku 1991, kdy byly vytvořeny, se vědci pokouší stanovit jejich index výkonnosti v oblasti mechaniky, elektřiny a termologie. Tento jev je způsoben odlišností chování materiálů vytvořených z jedné vrstvy oproti chování materiálů vytvořených z více vrstev. A zajišťuje vynikající výsledky testů prováděných na CNT.

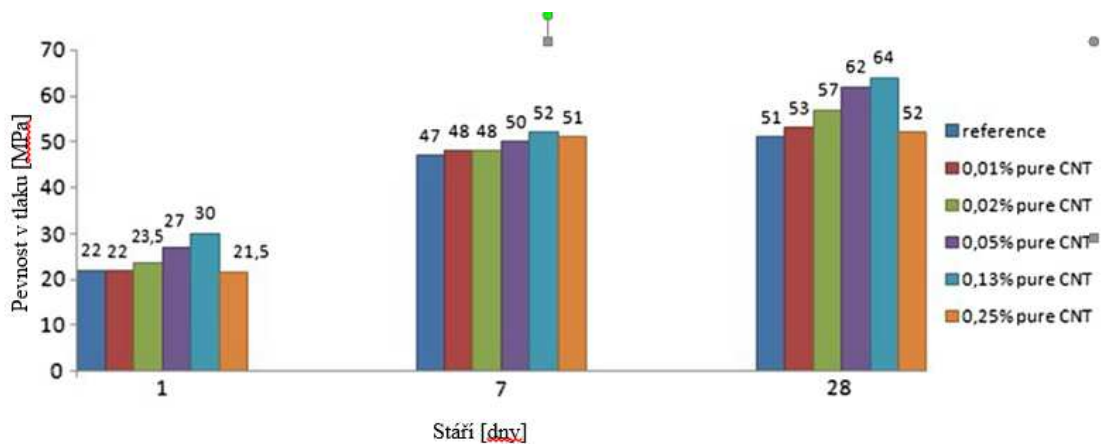
Co se týká výsledných vlastností, pevnosti v tahu jsou u SCNT a MCNT 500 GPa respektive 10-63 GPa [52,53]. Youngův modul SCNT je 1 TPa, zatímco u MCNT „pouze“ 0,21 TPa [53]. Jak vidíme, lepší vlastnosti vykazují jednostěnné nanotrubičky. Při zkoumání elektrických vlastností došli vědci k závěru, že vhodnou volbou struktury se může vodivost blížit ideálně vodivým teoretickým materiálům. K těmto vynikajícím vlastnostem se přidává a vysoká odolnost vůči působení vysokých teplot. Odolnost CNT je 2800 °C ve vakuu a až 750 °C na vzduchu. Při zkouškách byla stanovena tepelná vodivost při pokojové teplotě, rovnoběžně s osou na $3500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Zatímco kolmo k ose na pouhých $1,52 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

3.8.3.1 Zlepšení mechanických vlastností

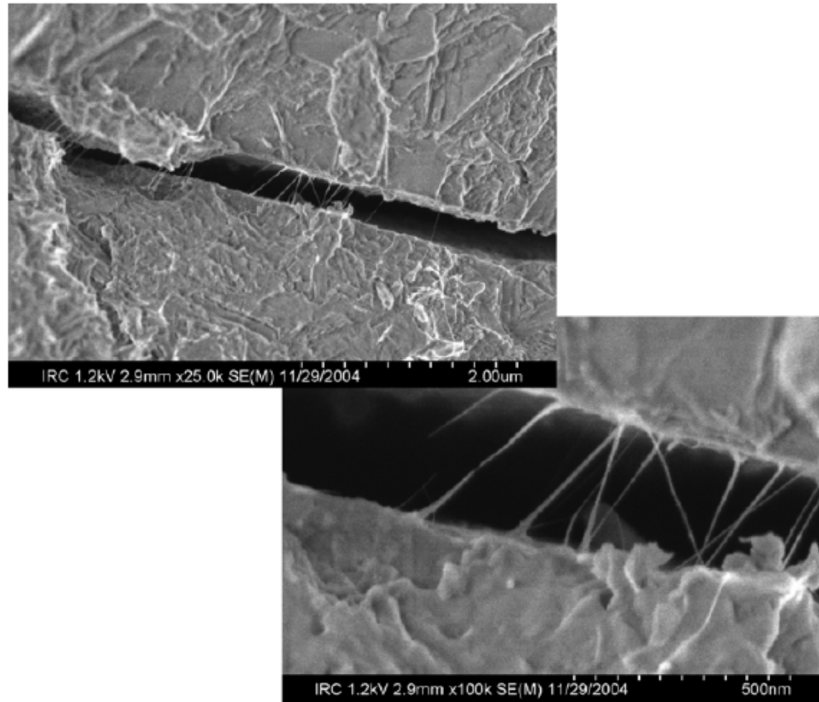
Díky velkému měrnému povrchu, vynikajícím mechanickým vlastnostem a chemické stabilitě se CNT ukázaly, jako velmi efektivní způsob vyztužení oproti klasickému

způsobu jako jsou skleněná, ocelová a jiná vlákna [54]. Při aplikacích CNT došlo k výraznému zlepšení všech pevnostních vlastností zejména pevnosti a modulu pružnosti a to o 200 % respektive 220 %. Ke zlepšení došlo i u tahových pevností o zhruba 270 %. A podobně tomu bylo u dalších vlastností [54]. K tomu abychom dosáhli nejlepších vlastností u betonu je potřeba věnovat zřetel mnoha faktorům – délce a průměru CNT, volbě dispergačních látek[52], optimální sonickou energii apod.

CNT poskytují 2 hlavní způsoby vyztužení struktury betonu. Primární je přemostění nano-pórů a mikro-pórů a trhlinek. Dalším způsob vyztužení spočívá v tom, že díky jejich rozměrům mohou vyplnit póry a mezery mezi zrny cementu a tím snížit pórovitost.



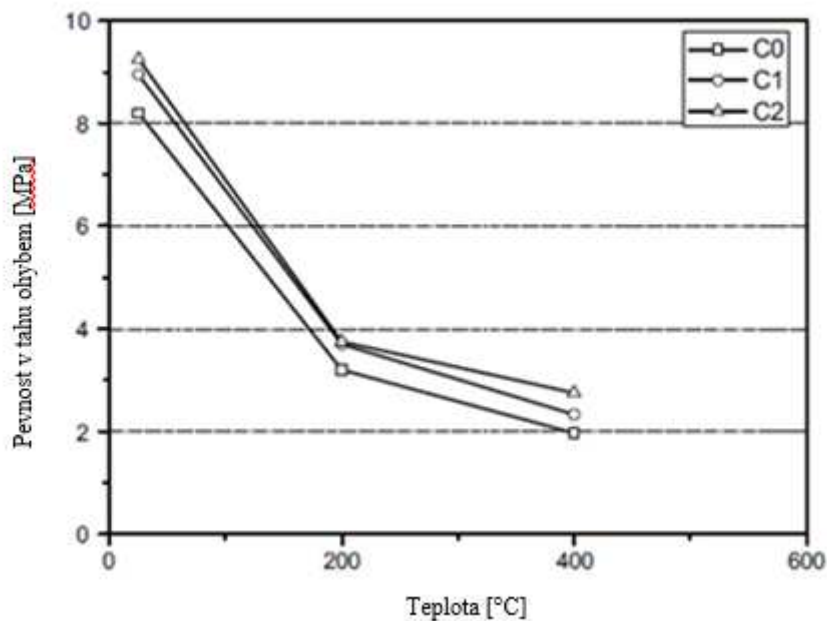
Obrázek č. 14 – Pevnosti v tlaku s přidavkem MCNT [42]



Obrázek č. 15 – Přemostění trhlinek pomocí CNT [14]

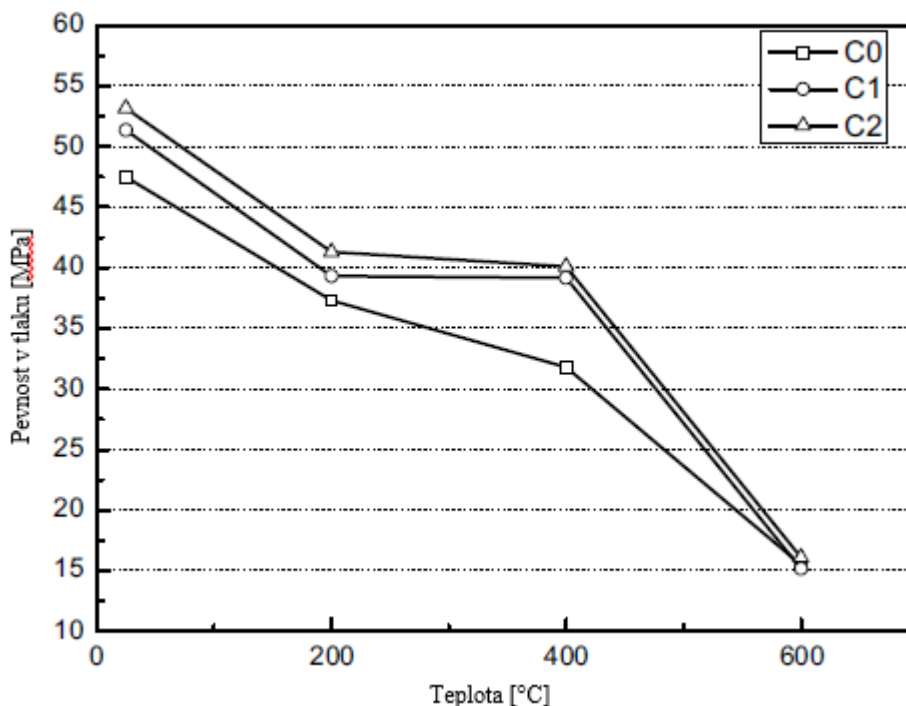
3.8.3.2 Chování betonu s přídavkem CNT vystavenému vysokým teplotám

Chování betonu s přídavkem CNT bylo ověřeno v testech provedených dle [13], kdy byly namíchány 3 směsi. Jedna referenční, 2. s přídavkem 0,1 % CNT s 3. s přídavkem 0,2 % CNT. Z těchto směsí byly vytvořeny trámečky 40x40x160 mm. Tyto kompozity byly po 28 dnech podrobeny tepelnému namáhání. Cílové teploty byly 200 °C, 400 °C, 600 °C s výdrží na každé teplotě 1 hodinu. Po zchlazení na teplotu 25 °C byly podrobeny zkoušce v tahu ohybem a na pevnosti v tlaku.



Obrázek č. 16 – Degradace tahové pevnosti CNT vyztuženého cementového kompozitu [13] C0 – Příklad 0,0 % CNT, C1 – Příklad 0,1 % CNT C2 – přídavek 0,2 % CNT

Z obrázku [16] můžeme vyčíst, že pevnost v tahu při teplotě 25 °C vzrostla o 9,1 % a 12,8 % při přídávku 0,1 % CNT, respektive 0,2 %. Při zahřátí na 200 °C došlo k prudkému poklesu tahových pevností u referenční směsi o 61,0 %, zatímco u směsi s přídávkem 0,1 % CNT 58,7 % a s přídávkem 0,2 % CNT 59,5 %. Vidíme, že pokles tahových pevností je téměř stejný u všech směsí. Z čehož usuzujeme, že přídavek CNT zlepšil vlastnosti jen minimálně. Při zahřátí na 400 °C došlo ke snížení pevností o 76,0 %, 73,9 % 70,2 % u směsi s přídávkem CNT 0,0 %, 0,1 %, 0,2 %. V rozmezí teplot 200 °C – 400 °C byl pokles pevností mírnější než v rozmezí 25 °C – 200 °C. Celkově přídavek 0,1 % CNT zlepšil pevnosti o 15,6 % a 18,3 % při teplotě 200 °C respektive 400 °C oproti směsi bez přídávku CNT. Podobně tomu bylo u směsi s přídávkem 0,2 % CNT, tento přídavek zvýšil pevnosti oproti referenční směsi o 17,2 % a 39,6 % při teplotě 200 °C respektive 400 °C. Při zkoušení vzorků zahřátých na 600 °C došlo k mimostřednému porušení vzorku, tudíž byl vyřazen z výsledků.



Obrázek č. 17 – Degradace tlakové pevnosti CNT vyztuženého cementového kompozitu [13] C0 – Příklad 0,0 % CNT, C1 – Příklad 0,1 % CNT C2 – přídavek 0,2 % CNT

Z obrázku [18] můžeme vyčíst zvýšení tlakové pevnosti při teplotě 25 °C o 8,1 % a 11,9 % s přídávkem 0,1 % CNT respektive 0,2 % CNT oproti směsi bez přídávku CNT. Při teplotě 200 °C došlo ke snížení pevností a to 21,5 %, 23,5 % a 22,3 %, u směsi s přídávkem CNT 0,0 %, 0,1 %, 0,2 %. Při dalším zvýšení teploty pokračoval pokles pevnosti u referenční směsi, kde byl pokles 14,7 %. Avšak pevnosti směsí s přídávkem CNT klesli pouze minimálně. Pevnost v tlaku směsi s přídávkem 0,1 % CNT klesla o 0,4 % a pevnost směsi s přídávkem 0,2 % klesla pouze o 2,9 %. Při zahřátí vzorku na konečnou teplotu 600 °C byl pokles pevností vzorků s přídávkem CNT rapidnější a u všech vzorků byl pokles pevností roven cca 70 %.

Podle [13] přídavek CNT nemá žádný vliv na průběh hydratace ani nedochází k chemické interakci mezi cementem a CNT. V rozmezí teplot 25 – 400 °C dojde k opětovnému procesu hydratace u zrn, u kterých doposud neproběhla, díky zvýšené teplotě a s ní spojenému zvýšenému tlaku páry z unikající vody. Při tomto procesu mohou CNT díky svému tvaru zapříčinit pokles tlaku, díky vytvoření kanálků umožňujících únik páry. Jak

již bylo popsáno výše, při teplotách nad 200 °C dojde k postupné dehydrataci C-S-H gelu a rozpadu krystalů. Při teplotách 400 – 600 °C dochází k explozivnímu odprýskávání vlivem tlaku páry v pórech. Tím dojde k roztržení póru a zvětšení dutiny, čímž ztratí CNT svoji schopnost přemostovat nano a mikro-trhlíky. A ztrácí svou účinnost. Co se týká pevností, ohybová pevnost klesá rychleji, než pevnost v tlaku. To je způsobeno větší citlivostí k přítomnosti trhlin u zkoušky betonu v tahu ohybem[43]. Z provedeného průzkumu vidíme, že přísávek CNT ať už v množství 0,1 nebo 0,2 % má pozitivní vliv na požární odolnost do 400 °C, kdy dosahoval lepších výsledků než směs bez přísávek CNT. A však při vyšších teplotách už je rozpad C-S-H gelu takový, že CNT ztrácí svoji schopnost přemostování mikrotrhlinek a pórů.

4 Experimentální část

4.1 I. etapa sledování vlastností betonů po tepelném zatížení

4.1.1 Metodika práce

Všechny složky betonu byly hmotnostně dávkovány do bubnové míchačky a zhomogenizovány. Nejdříve se promíchali všechny frakce kameniva, následně se přidal cement a po promíchání všech sypkých složek, byla přidána voda a plastifikační přísada. Následně po přidání vody se do směsi přisypali čedičová vlákna. Čerstvý beton byl uložen do předem určených forem.

U čerstvého betonu bylo stanovováno:

- Konzistence metodou sednutí kužele
- Obsah vzduchu
- Objemová hmotnost

U ztvrdlého betonu bylo stanovováno:

- Pevnost v tlaku po 28 dnech
- Objemová hmotnost
- Pevnost v tlaku a objemová hmotnost po teplotním zatížení
 - o Teploty pro beton s čedičovými vlákny – 400 °C, 600 °C, 800 °C
 - o Teploty pro beton s polypropylenovými vlákny – 400 °C, 600 °C, 800 °C
- Chování vláken v betonu při teplotním zatížení

4.1.2 Použité materiály

4.1.2.1 Pojivo

Jako pojivo byl použit cement CEM I 42,5 R – Českomoravský cement. Jedná se o cement, jehož jedinou složkou je portlandský slínek.

Tabulka č. 5 - Vlastnosti CEM I 42,5 R [12]

Parametr	Průměrná
Pevnost v tlaku [MPa] – 28 dní	61
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	9
Normální konzistence [%]	27,7
Počátek tuhnutí [min]	201
Konec tuhnutí [min]	264
Objemová stálost [mm]	0,8
Měrný povrch [m²·kg⁻¹]	381
Hydratační teplo [J·g⁻¹] – 7 dní	310
CaO [%]	64,2
SiO₂ [%]	19,5
Al₂O₃ [%]	4,7
Fe₂O₃ [%]	3,2
MgO [%]	1,3
SO₃ [%]	3,2
Cl [%]	0,047
K₂O [%]	0,78
Na₂O [%]	0,09
Na₂O ekvivalentní [%]	0,6
Nerozpustný zbytek [%]	0,7
Ztráta žháním [%]	3,3

4.1.3 Plnivo

Jako kamenivo bylo použito čedičové kamenivo z lomu Bílčice frakce 0-4, 4-8, 8-16 mm. Jedná se o přírodní drcené kamenivo z horniny – bazalt. Obsah SiO₂ je u čedičové horniny v rozmezí 44 – 52 % [10].

Tabulka č. 6 - Vlastnosti čedičového kameniva z Bílčic [10] [11]

Vlastnost	Hodnota pro frakci
Obsah celkové síry [% hm.]	0,048
Obsah chloridových solí [% hm.]	0,0004
Nasákavost [% hm.]	0,9
Objemová hmotnost kameniva [kg/m ³]	2 978
Tvar zrn – tvarový index > 3 [% hm.]	6,4
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m ³]	1 690
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva [kg/m ³]	1 520
Mezerovitost volně sypaného kameniva [% hm.]	48,9
Mezerovitost setřeseného kameniva [% hm.]	43,2
Petrografické složení	nepravidelně omezené hnědavé pyroxeny listovité, polysyntetické zdvojené plagioklasy rudní minerály (magnetit, ilmenit), jílové minerály oxihydroxidy Fe

4.1.4 Přísady

4.1.4.1 Superplastifikátor CHRYSO Fluid Optima 208

CHRYSO Fluid Optima 208 je superplastifikátor nové generace na bázi modifikovaných polykarboxylátů obzvláště vhodná pro transportní beton a beton pro velké inženýrské stavby. [48]

Tabulka č. 7 - Vlastnosti superplastikační přísady CHRYSO Fluid optima 208 [48]

Vlastnost	MasterGlenium SKY 507
Objemová hmotnost [kg·dm ⁻³]	1,05±0,015
Vzhled	Hnědozelená kapalina
Obsah chloridů max [%]	≤0,1
Obsah alkálií [ekviv Na ₂ O]	≤1,4
Obsah sušiny [%]	21,8±1,0
pH	7,0±2,0

4.1.4.2 Superplastifikátor Masterglenium SKY 507

Superplastifikátor MasterGlenium SKY 507 je superplastifikátor na bázi nové generace PCE pro transport beton. Speciální molekula zajišťuje zpožděnou absorpci na cementová zrna a snížení ztráty konzistence, přičemž však není negativně ovlivněn náběh počátečních pevností.

Tabulka č. 8 - Vlastnosti superplastikační přísady MasterGlenium SKY 507 [44]

Vlastnost	MasterGlenium SKY 507
Objemová hmotnost [g·ml⁻³]	1,09
Vzhled	Tmavě hnědá tekutina
Obsah chloridů max [%]	0,1
Obsah alkalií [ekviv Na₂O]	2,5

4.1.5 Rozptýlená výztuž

4.1.5.1 Čedičová vlákna

Čedičová vlákna jako rozptýlená výztuž byly použity od firmy Basaltex

Tabulka č. 9 - Vlastnosti čedičových vláken BCS D-L-X [9]

Vlastnost	BCS D-L-X
Hustota [kg·m⁻³]	2670
Bod tání [°C]	1350
Rozsah použití [°C]	-250 – 550
Vodní součinitel [-]	0,1
Průměr vlákna [μm]	17
Délka vlákna [mm]	24,4

4.1.5.2 Polypropylenová vlákna

Tenké krátké mikrovláknno vyhoří kolem teplot 160 °C, čímž vytvoří dutinky v betonu v případě požáru, do kterých může unikat tlak vytvořený vodními parami v důsledku odpařování. [46]

Tabulka č. 10 - Vlastnosti polypropylenových vláken Krampefibrin PM 3/15 [46]

Vlastnost	PM 3/15
Typ vlákna	Syntetické vlákno
Průřez	Kruhový
Délka [mm]	13±10%
Průměr [μm]	15±10%
Materiál	Polypropylen
Pevnost v tahu [MPa]	≥300
Modul pružnosti [MPa]	1300 - 1800

4.1.6 Složení betonů

Tabulka č. 11 - Receptury směsí s přidavkem čedičových vláken

Složka	Referenční směs MIX1	Směs s přidavkem čedičových vláken MIX1 BF
Cement [kg]	375	340
Kamenivo 0-4 Bílčice[kg]	1114	1188
Kamenivo 4-8 Bílčice [kg]	296	316
Kamenivo 8-16 Bílčice [kg]	552	589
Plastifikátor MasterGlenium Sky 507	5,6	6,1
Čedičová vlákna [kg]	-	5,7
Vodní součinitel [-]	0,54	0,47

Tabulka č. 12 – Receptury směsí s přidavkem PP vláken

Složka	Referenční směs MIX2	Směs s přidavkem PP vláken MIX2PP
Cement [kg]	300	300
Kamenivo 0-4 Bílčice[kg]	1162	1162
Kamenivo 4-8 Bílčice [kg]	340	340
Kamenivo 8-16 Bílčice [kg]	497	497
Plastifikátor Chrysofluid Optima 208	5,4	5,4
Polypropylenová vlákna [kg]	-	1,0
Vodní součinitel [-]	0,54	0,54

4.2 II. etapa detekce vláken po tepelném zatížení

4.2.1 Metodika práce

Jednotlivá vlákna byla vystavena působení vysokých teplot. Čedičová vlákna byla vystavena teplotám 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C. Polypropylenová a celulósová vlákna byla vystavena teplotám 100 °C, 150 °C, 200 °C. Následně byly na vláknech vizuálně posouzeny změny.

4.2.2 Použité materiály

4.2.2.1 Polypropylenová vlákna

Tenké krátké mikrovláknem vyhoří kolem teplot 160 °C, čímž vytvoří dutinky v betonu v případě požáru, do kterých může unikat tlak vytvořený vodními parami v důsledku odpařování. Polypropylenová vlákna se projevila jako jedno z nejvhodnějších řešení při zvyšování požární odolnosti betonu.[46]

Použitá vlákna:

Krampefibrin PM 12/18 a Krampe fibrin PM3/15

Tabulka č. 13 - Vlastnosti polypropylenových vláken Krampefibrin PM 12/18 a Krampefibrin 3/15 [46]

Vlastnost	PM 12/18	PM 3/15
Typ vlákna	Syntetické vlákno	Syntetické vlákno
Průřez	Kruhový	Kruhový
Délka [mm]	12±10%	13±10%
Průměr [μm]	18±10%	15±10%
Materiál	Polypropylen	Polypropylen
Pevnost v tahu [MPa]	≥300	≥300
Modul pružnosti [MPa]	1300 - 1800	1300 - 1800

Eurofibre HPR

PB Eurofibre HPR jsou patentované PP vlákna určená k maximalizaci požární odolnosti betonu. U těchto vláken dojde k vyhoření při nižší teplotě, zhruba 120 °C, než u běžných polypropylenových vláken. [47]

Tabulka č. 14 - Vlastnosti polypropylenových vláken PB Eurofibre HPR [47]

Vlastnost	PB EUrofibre HPR
Třída vlákna	Polypropylene
Délka vlákna [mm]	6
Průměr vlákna [μm]	15,4
Množství [vláken/kg]	1 miliarda
Délka [km/kg]	6 miliónů

4.2.2.2 Celulózová vlákna

Celulózová vlákna jsou do betonu přidávána především za účelem samošetřování betonu, snížení krvácení betonu, snižují výskyt trhlinek při tvrdnutí betonu, zlepšují rázovou houževnatost a mrazuvzdornost, požární odolnost. [48]

Použitá vlákna CHRYSO Fibre UF 500

Tabulka č. 15 - Vlastnosti celulózových vláken CHRYSO Fibre UF 500 [48]

Vlastnost	CHRYSO Fibre UF 500
Barva	Bílá
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,10
Délka [mm]	1,9 - 2,3
Tloušťka [μm]	14 - 17
Pevnost: v tahu [MPa]	600 - 900
Modul pružnosti v tahu [GPa]	8,5
Dávkování [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	450
Minimální doba míchání [min]	5

4.3 Výsledky I. etapy

4.3.1 Zkoušky čerstvého betonu

Tabulka č. 16 – Vlastnosti čerstvého betonu s přidavkem čedičových vláken

Beton	Obsah vzduchu [%]	Sednutí kužele [mm]	Objemová hmotnost čerstvého betonu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
MIX1	5,6	70	2540
MIX1BF	5,4	70	2550
MIX2	-	170	2510
MIX2PP	-	130	2490

4.3.2 Zkoušky ztvrdlého betonu

4.3.2.1 Vlastnosti ztvrdlého betonu

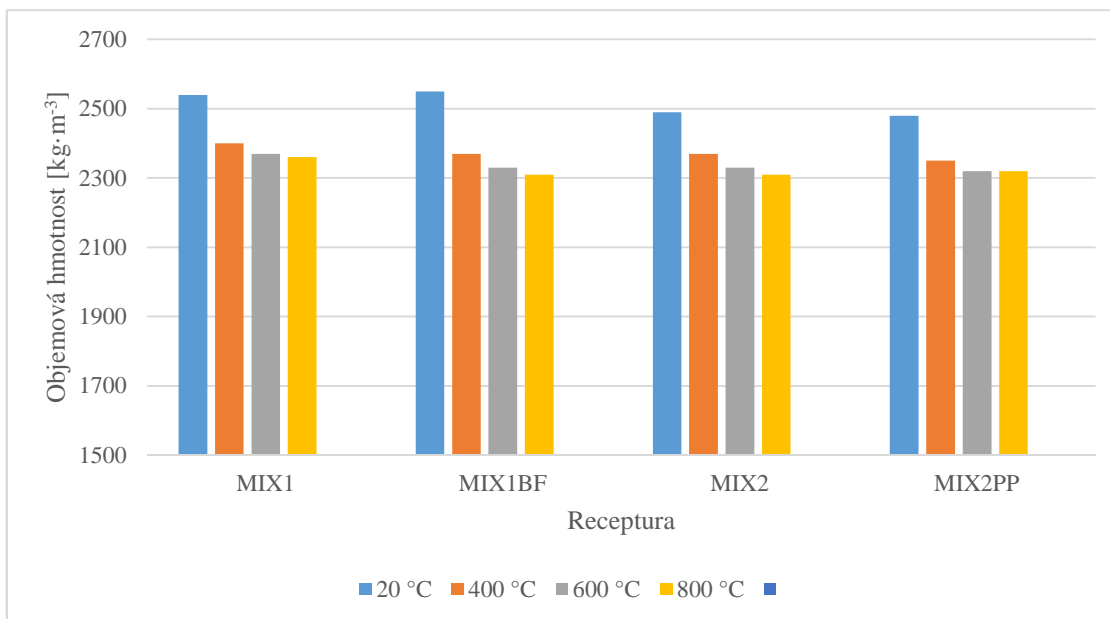
Tabulka č. 17 – Vlastnosti ztvrdlého betonu s přidavkem čedičových vláken

Beton	Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu [MPa]	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg·m ⁻³]
MIX1	57,5	2540
MIX1BF	58,0	2520
MIX2	55,2	2490
MIX2PP	52,9	2480

4.3.2.2 Objemová hmotnost po teplotním zatížení

Tabulka č. 18 – Objemová hmotnost betonu s čedičovými vlákny před a po tepelném zatížení

Teplota [°C]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]			
	MIX1	MIX1BF	MIX2	MIX2PP
20	2540	2550	2490	2480
400	2400	2370	2370	2350
600	2370	2330	2330	2320
800	2360	2310	2310	2320

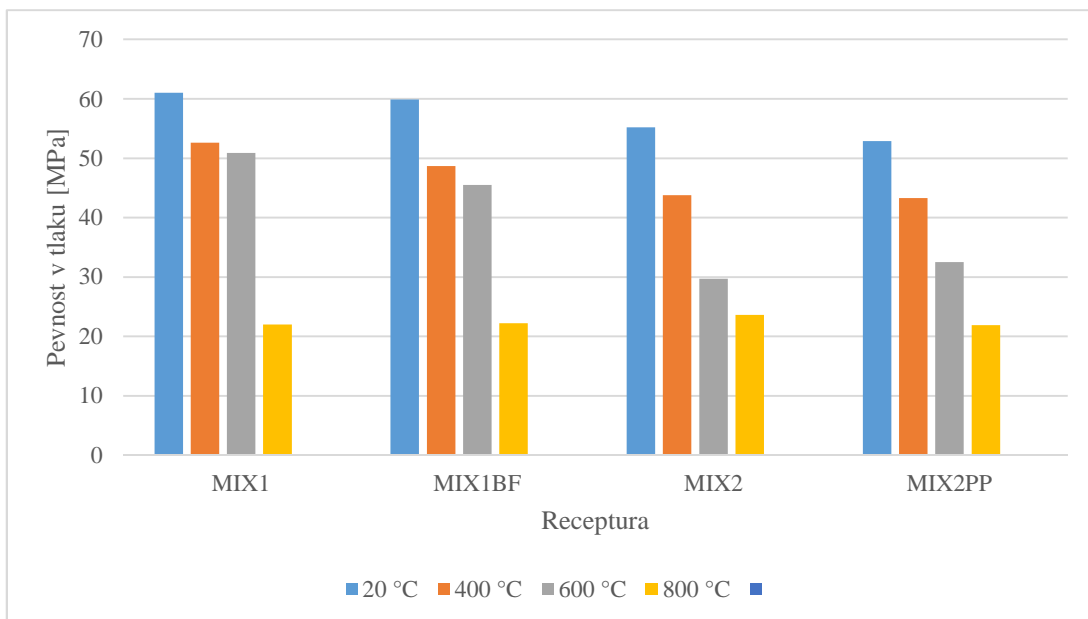


Graf č. 1 - Objemová hmotnost betonů před a po tepelném zatížení

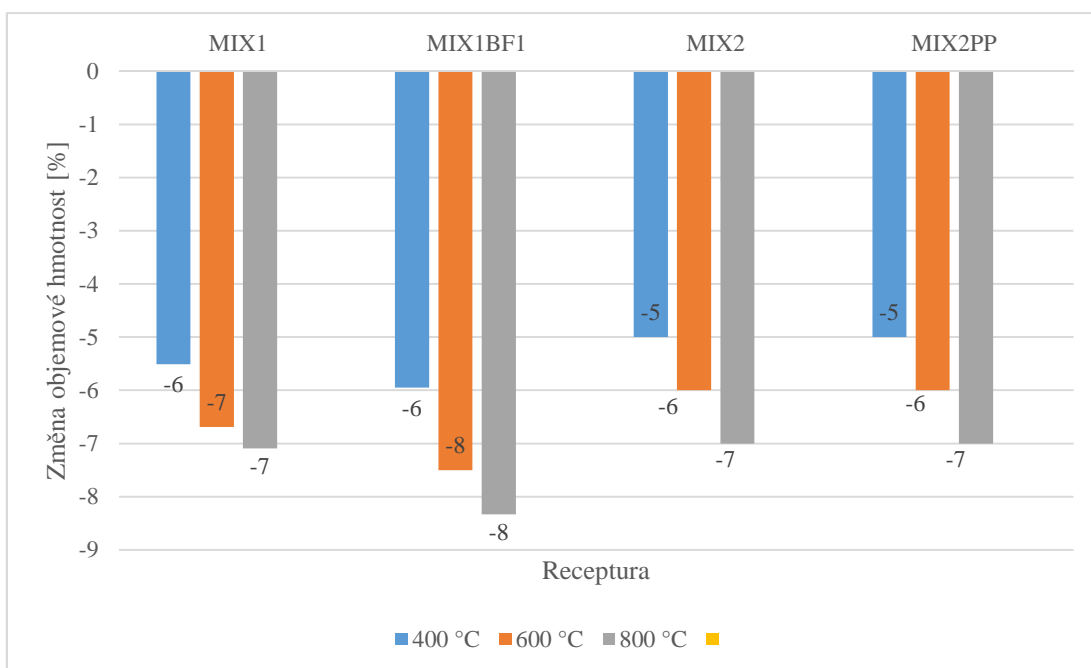
4.3.2.3 Pevnost betonů v tlaku po tepelném zatížení

Tabulka č. 19 – Pevnost v tlaku betonu s čedičovými vlákny před a po tepelném zatížení

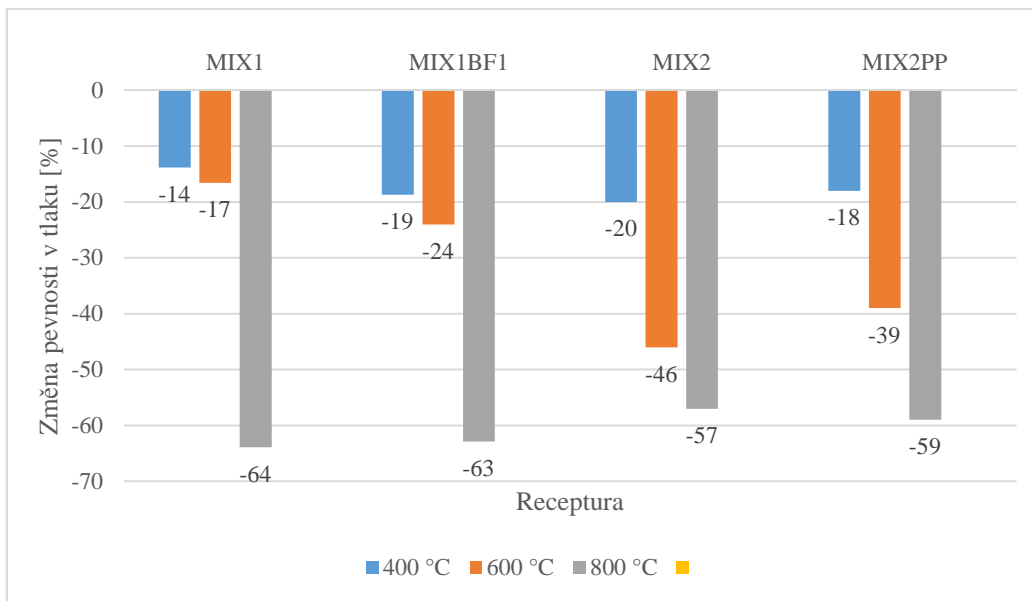
Teplota [°C]	Pevnost betonu v tlaku [MPa]			
	MIX1	MIX1BF	MIX2	MIX2PP
20	61,0	59,9	55,2	52,9
400	52,6	48,7	43,8	43,3
600	50,9	45,5	29,7	32,5
800	22,0	22,2	23,6	21,9



Graf č. 2 – Pevnost betonů v tlaku před a po tepelném zatížení



Graf č. 3 – Změna objemové hmotnosti po tepelném zatížení

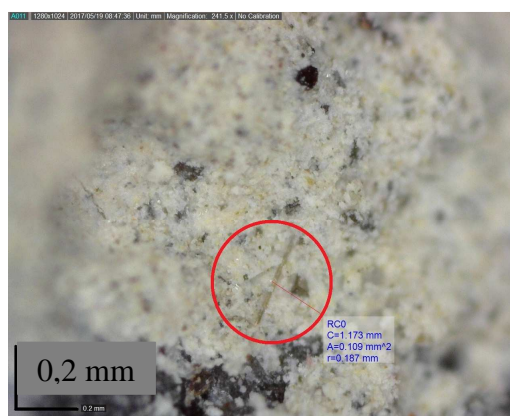


Graf č. 4 – Změna pevnosti v tlaku po tepelném zatížení

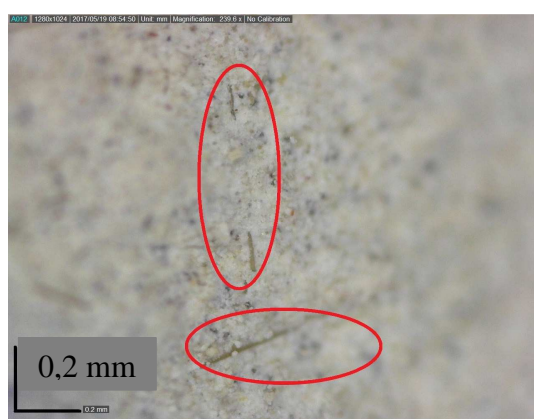
4.3.2.4 Čedičová vlákna v tepelně namáhaném betonu



Obrázek č. 18 – Beton vystavený teplotě 400 °C, červeně vyznačeno čedičové vlákno



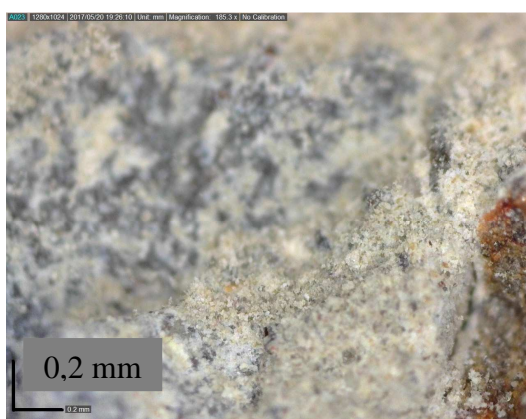
Obrázek č. 19 – Beton vystavený teplotě 400 °C, červeně vyznačeno čedičové vlákno



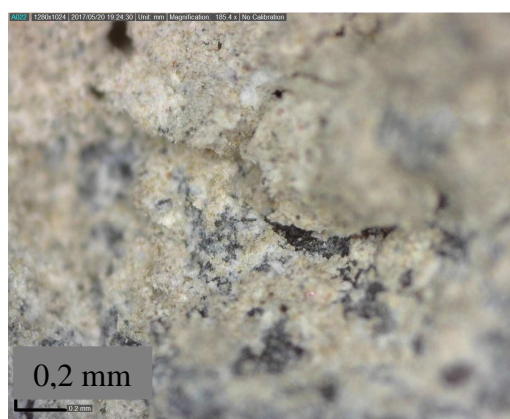
Obrázek č. 20 – Beton vystavený teplotě 600 °C, červeně vyznačeno čedičové vlákno



Obrázek č. 21 – Beton vystavený teplotě 600 °C, červeně vyznačeno čedičové vlákno



Obrázek č. 22 – Beton vystavený teplotě 800 °C, cementová matrice bez čedičových vláken, znatelná barevna změna kameniva



Obrázek č. 23 - Beton vystavený teplotě 800 °C, cementová matrice bez čedičových vláken, detekována trhlinka v cementové matrici

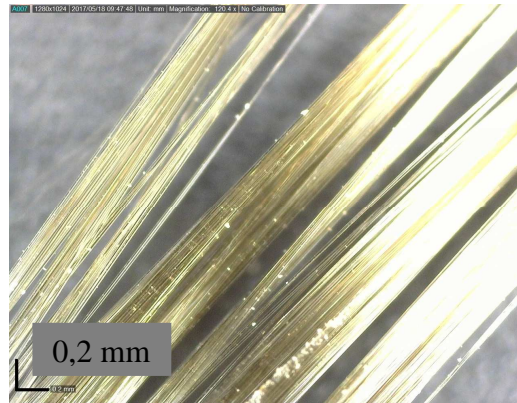
4.4 Výsledky II. etapy

4.4.1 Vizuální posouzení vláken

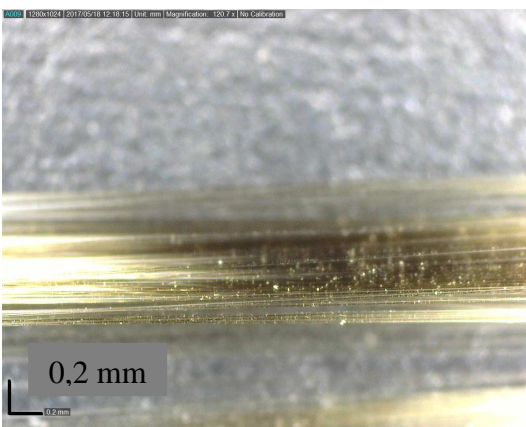
4.4.1.1 Čedičová vlákna



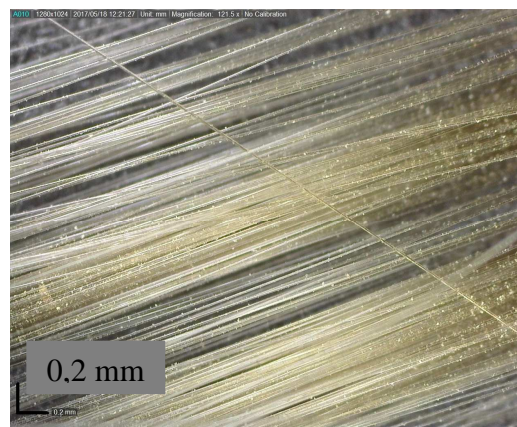
Obrázek č. 24 – Čedičová vlákna před tepelným zatížením



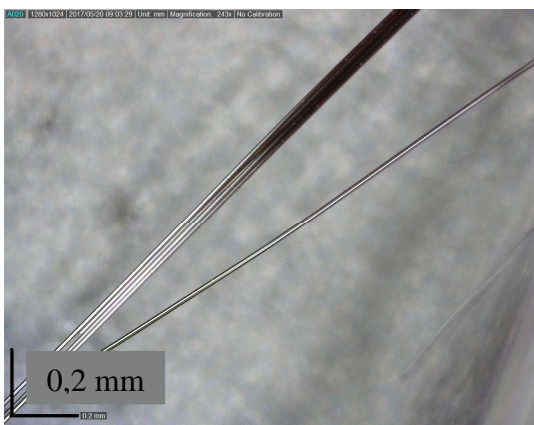
Obrázek č. 25 – Čedičová vlákna zahřátá na 200 °C



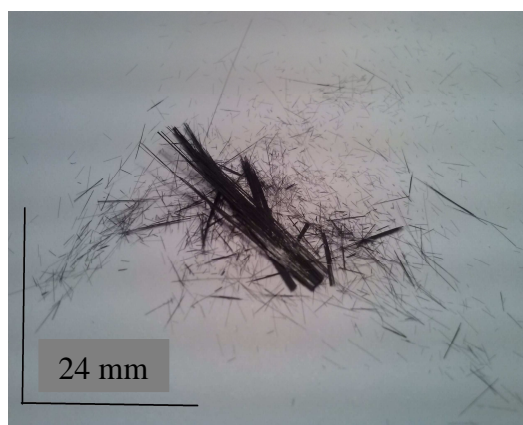
Obrázek č. 26 – Čedičová vlákna zahřátá na 400 °C



Obrázek č. 27 – Čedičová vlákna zahřátá na 600 °C

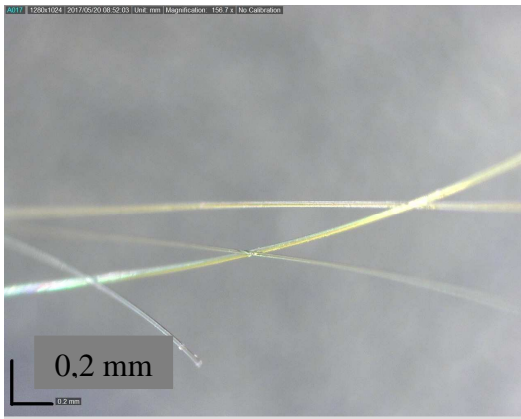


Obrázek č. 28 – Čedičová vlákna zahřátá na 800 °C, detekována změna barvy a zuhelnatění

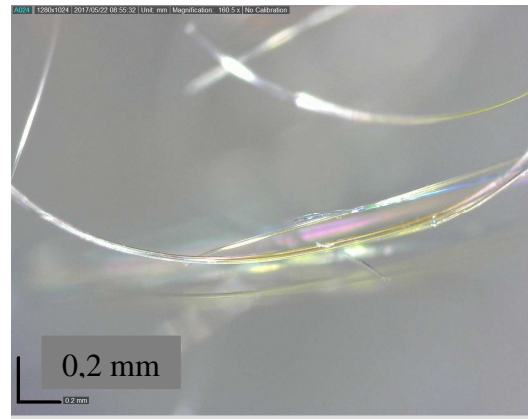


Obrázek č. 29 – Čedičová vlákna zahřátá na 800 °C, destrukce vláken

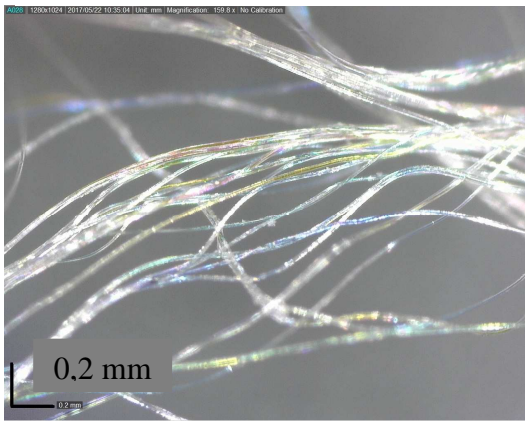
4.4.1.2 Polypropylenová vlákna PM 12/18



Obrázek č. 30 – Polypropylenová vlákna před teplotním namáháním

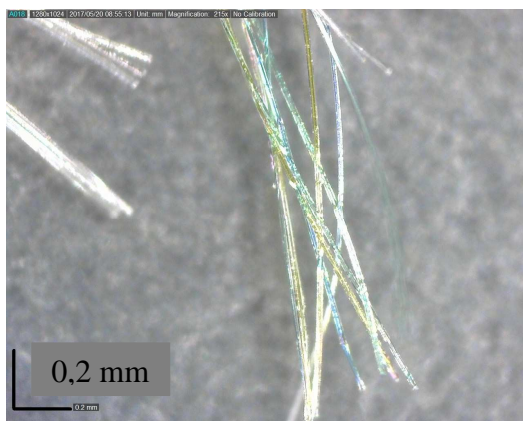


Obrázek č. 31 - Polypropylenová vlákna zahřátá na 100 °C, znatelná deformace vláken

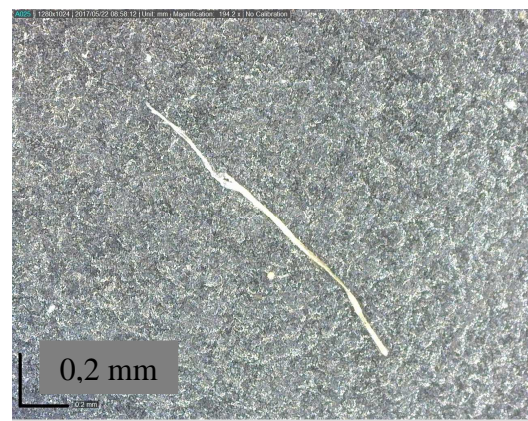


Obrázek č. 32 - Polypropylenová vlákna zahřátá na 150 °C, detekována značná deformace vláken, detekována změna bravy

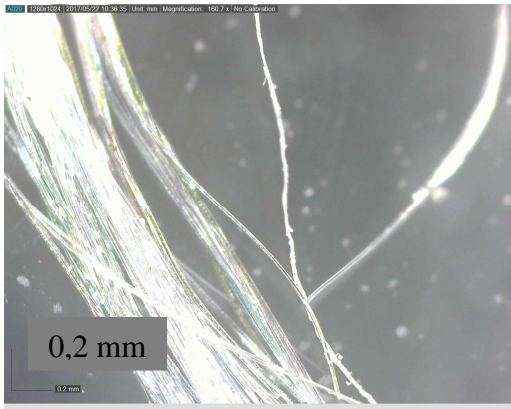
4.4.1.3 Polypropylenová vlákna PM 3/15



Obrázek č. 33 – Polypropylenová vlákna před tepelným namáháním

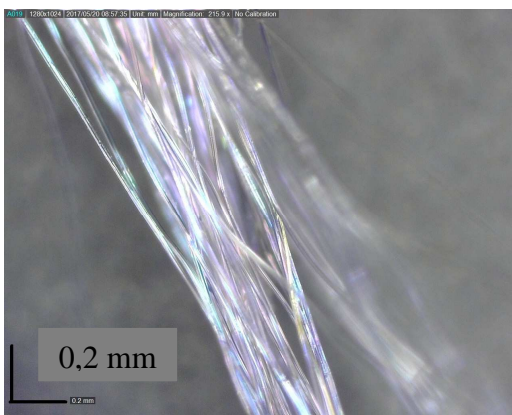


Obrázek č. 34 – Polypropylenová vlákna zahřátá na 100 °C, detekována deformace

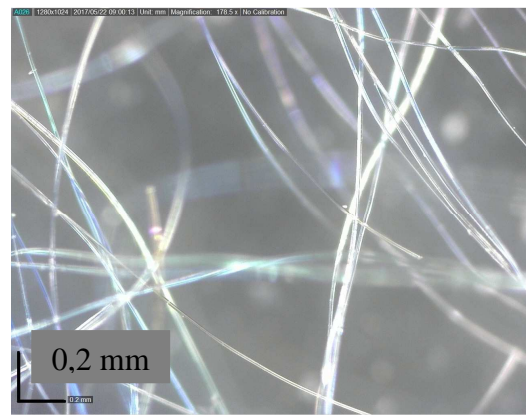


Obrázek č. 35 – Polypropylenová vlákna zahřátá na 150 °C, detekována značná deformace

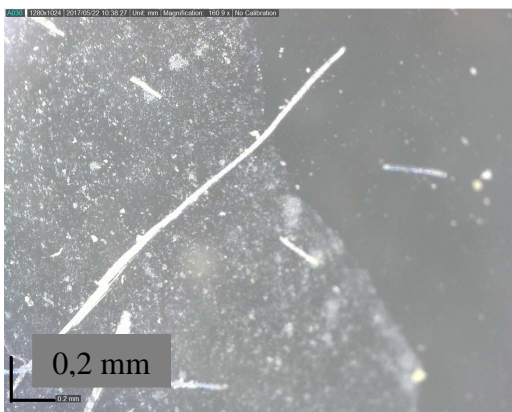
4.4.1.4 Polypropylenová vlákna Eurofibre HPR



Obrázek č. 36 – Polypropylenová vlákna před tepelným namáháním

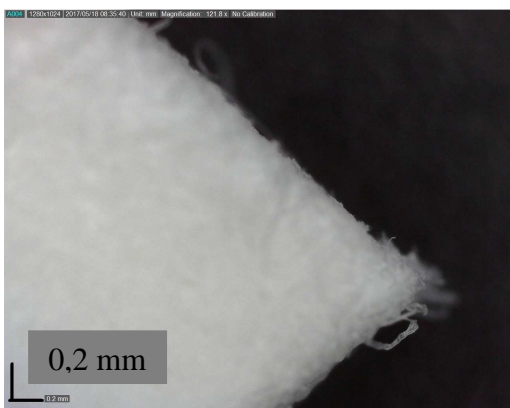


Obrázek č. 37 – Polypropylenová vlákna zahřátá na 100 °C, detekována deformace vláken



Obrázek č. 38 – Polypropylenová vlákna zahřátá na 150 °C, detekována deformace vláken a jejich deformace

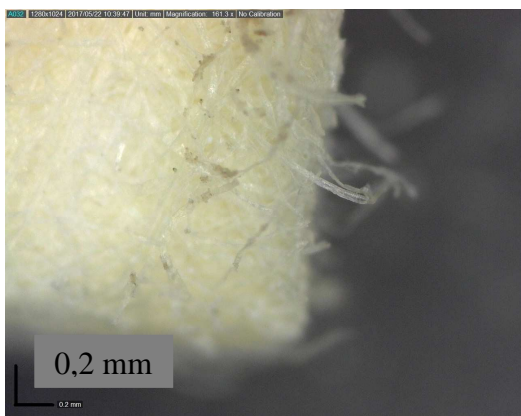
4.4.1.5 Celulózová vlákna



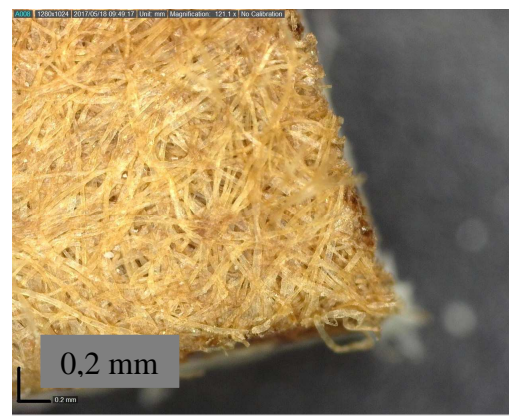
Obrázek č. 39 – Celulózová vlákna před tepelným namáháním



Obrázek č. 40 - Celulózová vlákna zahřátá na 100 °C, patrný počátek degradace



Obrázek č. 41 - Celulózová vlákna zahřátá na 150 °C, detekována značná degradace, změna barvy



Obrázek č. 42 - Celulózová vlákna zahřátá na 200 °C, ztelná změna barvy a degradace

5 Diskuze výsledků

5.1 I. Etapa

Co se týče objemových hmotností, beton s čedičovými vlákny a beton bez čedičových vláken nevykazovaly rozdíly ve změnách po tepelném zatížení. Změny objemových hmotností u betonů s vlákny byly od 6 do 8 %, změny u betonu bez vláken byly od 6 do 7 %. (změny po tepelném zatížení: u betonu s vlákny - po zahřátí na 400 °C byla ztráta objemové hmotnosti 6 %, po zahřátí na 600 °C 8 % a při zahřátí na 800 °C byla ztráta objemové hmotnosti 8 %. Beton bez přídavku vláken vykazoval ztráty objemových hmotností při 400 °C 6 %, při 600 °C 7 % ztrátu a při 800 °C byla ztráta 7 %.)

Při zkoušce pevnosti betonu v tlaku s přídavkem čedičových vláken byly zaznamenány tyto výsledky: při 400 °C byla ztráta pevnosti 19 %, při 600 °C 24 % a při zahřátí na 800 °C byla ztráta 63 %.

U betonu bez přídavku vláken byly změny pevností při 400 °C 14 %, při 600 °C 17 % a při 800 °C byla ztráta 64 %. Menší než u betonu s přídavkem čedičových vláken. Vidíme velmi podobnou ztrátu pevnosti u obou betonů vystavených 800 °C. Toto je dáno faktem, že čedičová vlákna ztrácejí svojí vlastnosti při 800 °C, čímž už nenapomáhají betonu při přemostování trhlinek. U betonů vystavených nižším teplotám (400 °C, 600 °C) byla vlákna v cementové matrici detekována. Viz obrázky č. 18-21, zatímco u betonu vystaveného teplotě 800 °C už vlákna nebyla detekována. Viz obrázky č. 22-23.

Teplota 800 °C u betonu s čedičovými vlákny byla zvolena pro otestování chování čedičových vláken, která jsou vyrobena při teplotách 1450-1500 °C a proto je předpoklad, že budou v betonu působit jako výztuž i při této teplotě na rozdíl od polypropylenových vláken, která mají efekt pro zvýšení odolnosti proti vysokým teplotám, že vyhoří při nižší teplotě

U betonu s polypropylenovými vlákny byly zaznamenány tyto změny objemových hmotností: při zahřátí na 400 °C byla ztráta 5 %, při teplotě 600 °C 6 % a při teplotě 800 °C 7 %. Změny objemových hmotnosti byly stejné jako u referenčního betonu bez přídavku polypropylenových vláken.

U betonu s polypropylenovými vlákny byla ztráta pevnosti v tlaku při teplotě 400 °C 18 %, při teplotě 600 °C 39 % a při teplotě 800 °C 59 %. U betonu bez polypropylenových

vláken byla ztráta pevnosti při teplotě 400 °C 20 %, při teplotě 600 °C 46 % a při teplotě 800 °C 57 %. Vidíme mírné zlepšení odolnosti betonu proti působení vysokých teplot při teplotě 600 °C.

5.2 II. Etapa

Čedičová vlákna byla vystavována teplotám 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C po dobu 30 minut. Tato vlákna do neprojevovala žádné změny až do teploty 600 °C. Zachovávaly si jak vizuální vlastnosti, tak i mechanické. Při vystavení teplotě 800 °C došlo k zuhelnatění vláken, změně barvy na černou a ztráty mechanických vlastností. Vlákna se dala lehce zlomit a docházelo k jejich drobení. Viz obrázky č. 24-29

Polypropylenová vlákna byla vystavena teplotám 100 °C, 150 °C, 200 °C. po dobu 30 minut. U polypropylenových vláken PM 12/18 můžeme u teploty 100 °C vidět deformaci vláken vlivem teploty a mírné zhnědnutí vláken. Při teplotě 150 °C už je deformace vláken značnější a zároveň došlo k částečnému roztavení vláken. Při teplotě 200 °C došlo již k úplnému roztavení vláken. Viz obrázky č. 30-32.

U polypropylenových vláken PM 3/15 je průběh podobný, u teploty 100 °C došlo k částečné deformaci, která se při teplotě 150 °C ještě zvýšila, a opět došlo k částečnému roztavení vláken. Úplné roztavení vláken nastalo u teploty 200 °C. Viz obrázky č. 33-35.

U polypropylenových vláken Eurofibre HPR byl proces obdobný. Při tomto testu se nepotvrdila vlastnost daná výrobcem, a to že vlákna vyhoří při teplotě zhruba 120 °C. Proto by bylo potřeba v tomto ohledu provést další testování vláken za pomoci přesnějších přístrojů. Viz obrázky č. 36-38.

Co se týče celulóзовých vláken Chrysofibre UF 500, ta byla testována na teploty 100 °C, 150 °C, 200 °C a 400 °C po dobu 30 minut, při zahřívání docházelo k postupnému spalování vláken, jak lze vidět na obrázcích č. 39-42. U těchto vláken nedocházelo k větším deformacím. Při působení teplot 400 °C už nebylo možné vlákna detekovat.

6 Závěr

Požární odolnost betonů je velmi důležitým faktorem při navrhování konstrukcí. Teoretická část bakalářské práce se zabývala rešerší chování betonu při vystavení vysokým teplotám a možnostem, jak zlepšit odolnost betonu proti působení vysokých teplot, potažmo únosnost betonových konstrukcí. Byly zpracovány informace o čedičových vláknech.

Experimentální část bakalářské práce byla rozdělena na dvě etapy. Zabývala se vlivem přídatku rozptýlené výztuže na odolnost betonu vůči působení vysokých teplot. V první etapě byl zkoumány vlastnosti betonů – byl zkoumán úbytek pevnosti v tlaku a úbytek objemové hmotnosti, v závislosti na přídatku čedičových a polypropylenových a působení teploty. V experimentu provedeném v bakalářské práci se neprokázal pozitivní účinek čedičových vláken na zvýšení odolnosti betonů vůči působení vysokých teplot. Ztráta pevnosti betonu v tlaku a ztráta objemové hmotnosti byla u betonu s přídatkem čedičových vláken srovnatelná jako u betonu bez čedičových vláken. Což je v rozporu s teorií, která předpokládá, že čedičová vlákna by měla zlepšovat odolnost betonu proti působení vysokých teplot díky přemostování trhlinek vzniklých při zahřívání betonu. Proto by bylo vhodné čedičová vlákna podrobit dalšímu přezkoumání. Při zkoumání struktury betonu byla vlákna neporušena až do teploty 600 °C, při teplotě 800 °C již nebylo možné vlákna v cementové matici detekovat. Při zkoušení vláken na tuto teplotu již došlo k zuhelnatění vláken a jejich rozpadu. Viz obrázky č. 24-29.

Beton s přídatkem polypropylenových vláken se ukázal jako vhodné řešení. Díky jejich nízké teplotě tavení dojde k vyhoření vláken při teplotě 160 °C a vytvoření pórové struktury, která umožňuje únik tlaku páry a pára následně neporuší strukturu betonu. Pozitivní účinek polypropylenových vláken se projevil u teploty 600 °C, kdy byla snížena ztráta pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti oproti referenční směsi.

V druhé etapě experimentální práce byl zkoumán vliv vysokých teplot na různé druhy rozptýlené výztuže. Čedičová vlákna nevykazovala žádné změny při tepelném zatěžování až do teploty 600 °C, při teplotě 800 °C došlo k jejich zuhelnatění a naprosté ztrátě mechanických vlastností.

U všech druhů polypropylenových vláken byl průběh chování při tepelném zatěžování podobný. Do teplot 150 °C všechny odolávaly avšak s projevem deformací a zabarvení. Při teplotě 200 °C došlo k jejich úplnému vyhoření. Polypropylenová vlákna Eurofibre HPR by měla, podle výrobce, vyhořet při teplotě zhruba 120 °C, čehož nebylo při experimentu dosaženo. V tomto případě by bylo opět vhodné provést další přezkoumání vláken za použití dokonalejší techniky. Celulózová vlákna prokázala vyšší tepelnou odolnost. Až do teploty 400 °C u nich nedocházelo k výraznějším deformacím, pouze k „ohořívání“ jednotlivých vláken. Při působení teploty 400 °C již nebylo možné vlákna detekovat.

Použití polypropylenových vláken už bylo v minulosti potvrzeno jako vhodné řešení při zlepšování odolnosti betonu proti působení vysokých teplot. Což se ukázalo i v tomto experimentu jak při použití v betonu, tak i při testování vláken pod tepelným namáháním. Čedičová vlákna se jeví jako slibná volba do budoucna, při zlepšování odolnosti betonu vůči působení vysokých teplot. Je však potřeba je podrobit dalšímu zkoumání a pozorování.

7 Seznam použité literatury

- [1] BRADÁČOVÁ, Isabela. *Stavby z hlediska požární bezpečnosti*. Brno: ERA, 2007. Technická knihovna (ERA). ISBN 978-80-7366-090-1.
- [2] ČSN EN 1992-1-2 (73 1201). *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Obecná pravidla: Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Český normalizační institut. Praha, 2006, 92s.
- [3] ČSN EN 1991-1-2, EUROKÓD 1. *Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: Český normalizační institut, 2004, 56s.
- [4] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [5] ČSN 73 1230. *Navrhování betonových konstrukcí pro zvýšené a vyšší teploty: Společná*. Praha: Český normalizační institut, 1990, 82s.
- [6] *Zkoušení požární odolnosti: Základní požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 48s.
- [7] ČSN 73 0802. *Požární bezpečnost staveb: Nevýrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 122s.
- [8] HAGER, I., *Behavior of high performance concretes at high temperature – evolution of mechanical properties*, PhD thesis (in french), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, november 2004, 182 p.
- [9] Basaltex. *Basaltex* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: www.basaltex.com
- [10] ŠČUČKA, J., MARTINEC, P., *Fyzikální vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice*, Analytický materiál zpracovaný pro potřeby řešení projektu: GAČR P104/12/1988 Studium interakce složek cementových kompozitů při působení vysokých teplot.
- [11] GREGEROVÁ, M., *PVE Dlouhé Stráně – oprava AB pláště horní nádrže petrograficko - mineralogicko - geochemické posouzení*, 2004, MS nepublikovaná zpráva, MU Brno.
- [12] Heidelberg cement. *Heidelberg cement* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.cz/cs>
- [13] ZHANG, L.W., M.F. KAI a K.M. LIEW. *Composites: Part A: Evaluation of microstructure and mechanical performance of CNTreinforced cementitious composites at elevated temperatures*. 2016, 8.
- [14] J. MAKAR, J. MARGESON, J. LUH, In: *3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*, Vancouver, B.C., (2005) 1.
- [15] VEEDU VP. *Multifunctional cementitious nanocomposite material and methods of making the same*. Patent: US, 7666327B1; 2011.
- [16] LUDVOG P, LADEIRA L, CALIXTO J, GGASPAR I, Melo V. *In-situ synthesis of multiwall carbon nanotubes on portland cement clinker*. In: 11th International conference on advanced materials, Rio de Janeiro, Brazil, Zář 20–25.
- [17] HUNASHYAL A, TIPPA SV, QUADRO S, BANAPURMATH N. *Experimental investigation on effect of carbon nanotubes and carbon fibres on the behavior of plain cement mortar composite round bars under direct tension*. ISRN Nanotechnol 2011;4(1):29–36.

- [18] Nasibulin AG, Shadakov SD, Nasibulina LI, Cwirzen A, Mudimela PR, Habermehl-Cwirzen K, et al. *A novel cement-based hybrid material*. New J Phys 2009;11(2):023013.
- [19] KUPILÍK, V., *Stavební konstrukce z požárního hlediska*, 1. vydání, Grada Publishing, Praha, 2006, p. 0-272, ISBN 80-247-1329-2.
- [20] REICHEL, V., *Hodnoty požární odolnosti stavebních konstrukcí*, VÚPS, Praha, 1971.
- [21] ČSN 73 0810, *Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 44 s.
- [22] ZHANG, B., BICANIC, N., PEARCE, J.CH., DAVID, P.V., *Relationship between brittleness and moisture loss of concrete exposed to high temperatures*, Cement and Concrete Research, 32(3), p. 363-371, 2002.
- [23] WITTMANN, F.H., *Hydraulic cement pastes*, p. 96-117, University of Sheffield, Weyham Springs, 1976.
- [24] VÍTEK, L., J., *Experimentální výzkum vlivu požáru na tunelové ostění*, sborník konference 14. Betonářské dny 2007, ČBS Servis s.r.o., Hradec Králové, 2007, p. 80-85, ISBN 978-80-87158-04-3.
- [25] COLLEPARDI, M., *Moderní beton*, Betonové stavitelství, Praha, 2009, p. 0-342, ISBN 978-80-87093-75-7.
- [26] HELA, R., BARTOS, P.J.M., SCHUTTER, G., DOMONE, P., GIBBS, J., *Samozhutnitelný beton*, ČBS Service s.r.o. and ČSSI, Praha, 2008, ISBN 978-80-87158-12-8.
- [27] CLEMENT, F., *Fire protection options in tunnels*, presentation, Ostrava, 2006.
- [28] BENEŠ, M., *Tepelné odprýskávání betonu exponovaného účinkům vysokých teplot*, Technické listy 2007, Cideas, 1.vyd., Praha 2008, p. 63-64, ISBN 978-80-01-04174-1.
- [29] VERBECK, G., COPELAND, L.E., *Some physical and chemical aspect of high pressure steam curing*, Menzel symposium on High Pressure Steam Curing, ACI publication SP-32, 1972.
- [30] ALONSO, C., FERNANDEZ, L., *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*, J. Mater. Sci., 2004, vol. 39, p. 3015-3024.
- [31] SIČÁKOVÁ, A. a kolektiv, *New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications*, 1. vydání Košice, červen 2008, 156 s, ISBN 978-80-553-0040-5.
- [32] SANJAYAN, HEO Y-S a J.G. HAN. *Effect of fiber type, length and numbers of fibers per unit volume on spalling, protection of high strength concrete: Firts International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Edited by F. DEHN, E. KOENDERS, Leipzig 2009.
- [33] NOVÁKOVÁ, I a BODNÁROVÁ, L. *High Strength Concrete with Enhanced Properties by Addition of Chopped Basalt Fibres*. 2016, , 7.
- [34] MILITKY J, KOVACIC V, RUBNEROVA J. *Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt*. Eng Fract Mech 2002;69:1025e33.
- [35] MILITKY, J, KOVACIC, V. *Ultimate mechanical properties of basalt filaments*. Text Res 1996;66:225e9.
- [36] HAO, LC, YU, WD. *Evaluation of thermal protective performance of basalt fibre nonwoven fabrics*. J Therm Anal Calorim 2010;100:551e5.
- [37] *Fire Design of Concrete Structures - Materials, Structures and Modelling*, Bulletin 38, F´ederation Internationale du B´eton, p. 97, Lausanne, 2007.
- [38] N.R. SHORT, J.A. PURKISS, and S.E. GUISE, “Assessment of fire damaged concrete using color image analysis”, *Construction and Building Materials* 15, 9–15 (2001).
- [39] KLINSCH, E. a FRANGI, A. *Experimental analysis on changes of the porosity of ultrahigh performance concrete at elevated temperatures*. 2011, 8

- [40] FIORE, V, T SCALICI, G DI BELLA a A VALENZA. *Composites Part B: A review on basalt fibre and its composites*. 2015, , 21.
- [41] DEAK T, CZIGANY T. *Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibre comparison*. Text Res J 2009;79:645e51.
- [42] PETRUNIN S, VAGANOV V, SOBOLEV K. *The effect of functionalized carbon nanotubes on the performance of cement composites*.
- [43] ÇAVDAR, A. *A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites*. Compos Part B: Eng 2012;43 (5):2452–63.
- [44] BASF. *Master-builders* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.master-builders-solutions.basf.cz/cs-cz/products/mastergleniumsky/2985>
- [45] TYSON, BM. *Carbon nanotube and nanofiber reinforcement for improving the flexural strength and fracture toughness of Portland cement paste* PhD Diss. Texas A&M University; 2010.
- [46] KrampeHarex. *KrampeHarex* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.krampeharex.com/>
- [47] Eurofibre. *Eurofibre* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://baumhueter-extrusion.com/content/59/44/products/pb-eurofiber-hpr>
- [48] CHRYSO. CHRYSO [online][cit.2017-05-22] Dostupné z:<http://www.chryso.cz/p/7500/chryso-fluid-optima-208>
- [49] Fire design of concrete structures: materials, structures and modelling. *First international workshop on concrete spalling due to fire exposuer*. Lausanne, 2007.
- [50] LI, W, XU, J. *Mechanical properties of basalt fibre reinforced geopolymeric concrete under impact loading*. Mat Sci Eng A Struct 2009;505:178e86.
- [51] LI, W, XU J. *Impact characterization of basalt fibre reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar*. Mat Sci Eng A Struct 2009;513e514:145e53.
- [52] YU M-F, LOURIE O, DYER, MJ, MOLONI, K, KELLY, TF, RUOFF, RS. *Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load*. Science 2000;287(5453):637–40.
- [53] XEI, X, MAI, Y, ZHOU, X. *Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review*. Mater Sci Eng: R: Rep 2005;49(4):89–112.
- [54] HAN, B, SUN, S, DING, S, ZHANG, L, YU, X, OU, J. *Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites*. Compos Part A: Appl Sci Manuf 2015;70:69–81.
- [55] HAO, LC, YU WD. *Evaluation of thermal protective performance of basalt fibre nonwoven fabrics*. J Therm Anal Calorim 2010;100:551e5.
- [56] Basaltex. Basaltex [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://basaltex.cz/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1 – Povrch betonu vystaven teplotě 600 °C a) s vápenatým kamenivem b) s křemičito vápenatým kamenivem [8].....	19
Obrázek č. 2 – Barevné změny zahřívání betonu s odhaleným kamenivem a s běžným povrchem, pevnost betonu 97 MPa [8].....	20
Obrázek č. 3 – Změny pevností v tlaku v závislosti na teplotě pro betony s různými vodními součiniteli [8].....	21
Obrázek č. 4 - Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku způsobené zvýšením teploty [25].....	24
Obrázek č. 5 - Struktura betonu zahřátá na 800 °C, beton složený z čedičového kameniva, foto autor.....	25
Obrázek č. 6 – Vliv přídatku PP vláken na odolnost betonu proti vysokým teplotám [39]	28
Obrázek č. 7 – Čedičová vlákna foto autor.....	29
Obrázek č. 8 – Zjednodušené schéma výroby čedičových vláken: 1) zásobník rozdrčeného čediče 2) plnicí zařízení 3) transport materiálu 4) dávkovač 5) primární tavící zóna 6) sekundární tavící zóna 7) pouzdro tvořící vlákna 8) tvorba vláken 9) tvarování vlákna 10) napínání vlákna 11) automatický navíječ vlákna [41]	30
Obrázek č. 9 – Tkaná síťovina [56]	32
Obrázek č. 10 – Nekonečná vlákna [56].....	32
Obrázek č. 11 – Tkaná izolace [56]	32
Obrázek č. 12 – Tkanina [56]	32
Obrázek č. 13 – Schéma SCNT (a) a MCNT (b) [45]	35
Obrázek č. 14 – Pevnosti v tlaku s přídatkem MCNT [42]	36
Obrázek č. 15 – Přemostění trhlinek pomocí CNT [14]	37
Obrázek č. 16 – Degradace tahové pevnosti CNT vyztuženého cementového kompozitu [13] C0 – Přídatek 0,0 % CNT, C1 – Přídatek 0,1 % CNT C2 – přídatek 0,2 % CNT	38

Obrázek č. 17 – Degradace tlakové pevnosti CNT vyztuženého cementového kompozitu [13] C0 – Příklad 0,0 % CNT, C1 – Příklad 0,1 % CNT C2 – Příklad 0,2 % CNT	39
Obrázek č. 18 – Beton vystavený teplotě 400 °C, červeně vyznačeno čedičové vlákno	52
Obrázek č. 19 – Beton vystavený teplotě 400 °C, červeně vyznačeno čedičové vlákno	52
Obrázek č. 20 – Beton vystavený teplotě 600 °C, červeně vyznačeno čedičové vlákno	52
Obrázek č. 21 – Beton vystavený teplotě 600 °C, červeně vyznačeno čedičové vlákno	52
Obrázek č. 22 – Beton vystavený teplotě 800 °C, cementová matrice bez čedičových vláken, znatelná barevná změna kameniva.....	52
Obrázek č. 23 - Beton vystavený teplotě 800 °C, cementová matrice bez čedičových vláken, detekována trhlinka v cementové matici	52
Obrázek č. 24 – Čedičová vlákna před tepelným zatížením.....	53
Obrázek č. 25 – Čedičová vlákna zahřátá na 200 °C.....	53
Obrázek č. 26 – Čedičová vlákna zahřátá na 400 °C.....	53
Obrázek č. 27 – Čedičová vlákna zahřátá na 600 °C.....	53
Obrázek č. 28 – Čedičová vlákna zahřátá na 800 °C, detekována změna barvy a zuhelnatění.....	53
Obrázek č. 29 – Čedičová vlákna zahřátá na 800 °C, destrukce vláken.....	53
Obrázek č. 30 – Polypropylenová vlákna před teplotním namáháním	54
Obrázek č. 31 - Polypropylenová vlákna zahřátá na 100 °C, znatelná deformace vláken	54
Obrázek č. 32 - Polypropylenová vlákna zahřátá na 150 °C, detekována značná deformace vláken, detekována změna barvy	54
Obrázek č. 33 – Polypropylenová vlákna před tepelným namáháním	54

Obrázek č. 34 – Polypropylenová vlákna zahřátá na 100 °C, detekována deformace ..	54
Obrázek č. 35 – Polypropylenová vlákna zahřátá na 150 °C, detekována značná deformace.....	55
Obrázek č. 36 – Polypropylenová vlákna před tepelným namáháním	55
Obrázek č. 37 – Polypropylenová vlákna zahřátá na 100 °C, detekována deformace vláken.....	55
Obrázek č. 38 – Polypropylenová vlákna zahřátá na 150 °C, detekována deformace vláken a jejich deformace	55
Obrázek č. 39 – Celulózová vlákna před tepelným namáháním.....	56
Obrázek č. 40 - Celulózová vlákna zahřátá na 100 °C, patrný počátek degradace	56
Obrázek č. 41 - Celulózová vlákna zahřátá na 150 °C, detekována značná degradace, změna barvy.....	56
Obrázek č. 42 - Celulózová vlákna zahřátá na 200 °C, znatelná změna barvy a degradace	56

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 - Přehled změn v mikrostruktuře betonu při zahřívání [8].....	19
Tabulka č. 2 - Lineární tepelné roztažnosti pro různé typy hornin [31].....	24
Tabulka č. 3 - Složení čedičových vláken [56].....	30
Tabulka č. 4 - Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [56]	33
Tabulka č. 5 - Vlastnosti CEM I 42,5 R [12].....	42
Tabulka č. 6 - Vlastnosti čedičového kameniva z Bílčic [10] [11].....	43
Tabulka č. 7 - Vlastnosti superplasticizační přísady CHRYSO Fluid optima 208 [48]..	43
Tabulka č. 8 - Vlastnosti superplasticizační přísady Masterglenium SKY 507 [44]	44
Tabulka č. 9 - Vlastnosti čedičových vláken BCS D-L-X [9]	44
Tabulka č. 10 - Vlastnosti polypropylenových vláken Krampefibrin PM 3/15 [46].....	44
Tabulka č. 11 - Receptury směsí s přídavkem čedičových vláken	45
Tabulka č. 12 – Receptury směsí s přídavkem PP vláken	45
Tabulka č. 13 - Vlastnosti polypropylenových vláken Krampefibrin PM 12/18 a Krampefibrin 3/15 [46]	46
Tabulka č. 14 - Vlastnosti polypropylenových vláken PB Eurofibre HPR [47].....	46
Tabulka č. 15 - Vlastnosti celulózových vláken CHRYSO Fibre UF 500 [48].....	47
Tabulka č. 16 – Vlastnosti čerstvého betonu s přídavkem čedičových vláken.....	47
Tabulka č. 17 – Vlastnosti ztvrdlého betonu s přídavkem čedičových vláken.....	48
Tabulka č. 18 – Objemová hmotnost betonu s čedičovými vlákny před a po tepelném zatížení	48
Tabulka č. 19 – Pevnost v tlaku betonu s čedičovými vlákny před a po tepelném zatížení	49

SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1 - Objemová hmotnost betonů před a po tepelném zatížení.....	49
Graf č. 2 – Pevnost betonů v tlaku před a po tepelném zatížení.....	50
Graf č. 3 – Změna objemové hmotnosti po tepelném zatížení	50
Graf č. 4 – Změna pevnosti v tlaku po tepelném zatížení.....	51