

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

# Diplomová práce

Betony s odolností proti vysokým teplotám

Concrete with high temperature resistance

Student:

Bc. Lucie Siwá

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Šafrata, Ph.D

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lucie Siwá**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Betony s odolností proti vysokým teplotám**  
**Concrete with high temperature resistance**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Popište betony s odolností proti vysokým teplotám. Uveďte, pro jaké účely se používají a jaké jsou způsoby jejich výroby.
2. Uveďte normy, dle jakých se posuzuje teplotní odolnost betonů a žárobetonů.
3. Popište pojiva, plniva, vlákna a další suroviny, vhodné pro použití do betonů odolných proti vysokým teplotám.
4. Navrhněte složení a namíchejte záměsi betonu ze silikátového cementu CEM III/A 42,5N a z hlinitanových cementů Gorkal při použití kameniva na bázi čediče a žáruvzdorného lupku typu D 462 HR.
5. Na vyrobených vzorcích sledujte vliv působení teplot do 1300 °C na změnu fyzikálně mechanických vlastností. Porovnejte s referenčním betonem.
6. Naměřené výsledky vyhodnoťte a výsledky přehledně vyjádřete. Stanovte teplotní limity použití.

### Seznam doporučené odborné literatury:

TOMŠŮ, F., PALČO, Š.: Žáruvzdorné materiály. 1. vyd. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2009, 110 s. ISBN 978-80-02-02170-4.

ČSN EN ISO 1927-1. Žáruvzdorné výrobky netvarové (monolitické) - Část 1: Úvodní ustanovení a klasifikace (2013).

PYTLÍK, P.: Technologie betonu, 2. vyd. BRNO: VUTIUM, 2000. 390 stran. ISBN 80-214-1647-52000

### Firemní literatura

<http://www.cluz.cz/> České lupkové závody  
<http://www.silikaweb.cz>

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně za odborného vedení. Dále prohlašuji, že jsem uvedla použitou literaturu a další podkladové materiály.

V Ostravě dne

.....

podpis

## **Prohlašuji:**

- Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Šafratovi, Ph.D. za konzultace, odborné rady a poskytnuté materiály k práci. Dále bych ráda poděkovala Ing. Davidu Janíčkoví a Ing. Herbertu Powetzovi za pomoc při realizování mé praktické části diplomové práce a odborných konzultací. V neposlední řadě děkuji manželovi a rodině, kteří měli trpělivost a podporovali mě ve studiu.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá betony s odolností proti vysokým teplotám. Řeší se zejména jejich druhy, použití a normy, dle jakých se posuzuje teplotní odolnost betonů a žárobetonů.

V teoretické části jsou popsány používané suroviny do betonů s odolností proti vysokým teplotám. Jedná se o pojiva, plniva a různá vlákna.

V praktické části jsou popsány zkoušky, které se prováděly na čerstvé směsi a následně i na ztvrdlém betonu dle platných norem v České republice. Navrženy byly dvě betonové směsi, které se lišily použitým kamenivem a cementem. Zkušební vzorky byly dále vypáleny na teploty 200 °C, 400 °C, 600°C, 900 °C, 1 100 °C a 1 200 °C. Z každé receptury byly vytvořeny referenční vzorky. Po výpalu se všechny vzorky zkoušely na pevnost tlaku a následně byly vzorky navzájem porovnávány a vyhodnoceny.

## **Abstract**

This thesis studies high temperature resistant concretes. It deals particularly with their types, uses and norms according to which the heat resistancy of concretes and of fire resistant concretes is evaluated.

The theoretical part describes the materials used for high temperature resistant concretes, this boxing agents, additives and various fibres.

The practical part analyze stests performed on a fresh mixture and subsequently also on the hardened concrete according to the directives in force in the Czech Republic. Two concrete mixtures were designed, differing in aggregate and cement used in the mixture. Test samples were fired at temperatures: 200 °C, 400 °C, 600°C, 900 °C, 1 100 °C and 1 200 °C. From each recipe, reference samples were created. After firing, each of the samples were tested for compressive strength and subsequently compared and evaluated.

## **Klíčová slova**

Žárový beton, ocelová vlákna, polypropylenová vlákna, explozivní odprýskávání, teplotní zatěžování betonu, čedičové kamenivo, lupkové kamenivo

## **Keywords**

Refractory concrete, steel fibers, polypropylene fibers, explosive spalling, thermal loading of concrete, basalt aggregates, quarry aggregates

## Obsah

1. Úvod .....	11
TEORETICKÁ ČÁST .....	12
2. Betony s odolností proti vysokým teplotám .....	12
2.1. Žárovbetony .....	12
2.2. Rozdělení žárovbetonu .....	13
2.3. Typy žárovbetonu .....	14
2.3.1. DC - Hutné žárovbetony.....	14
2.3.2. IC – Izolační žárovbetony .....	14
2.3.3. CBC – Žárovbetony s chemickou vazbou .....	15
2.3.4. HBC – Žárovbetony s hydraulickou vazbou .....	15
2.3.5. RCC – Běžný žárovbeton .....	15
2.3.6. DCC – Žárovbeton ztekucený .....	16
2.3.7. MCC – Žárovbetony se středním obsahem cementu .....	16
2.3.8. LCC – Žárovbetony s nízkým obsahem cementu .....	16
2.3.9. ULCC – Žárovbetony s velmi nízkým obsahem cementu .....	17
2.3.10. NCC – Žárovbetony bezcementové.....	17
2.4. Druhy vazeb netvarových žáruvzdorných materiálů.....	18
2.4.1. Keramická vazba.....	19
2.4.2. Hydraulická vazba.....	19
2.4.3. Anorganicko – chemická vazba .....	20
2.4.4. Organicko – chemická vazba.....	20
2.5. Konverze.....	20
2.6. Netvarové žáruvzdorné materiály .....	21
2.7. Požární odolnost.....	22
2.8. Ohnivzdornost.....	22
2.9. Požární bezpečnost.....	22



2.10.	Použití betonu s odolností proti vysokým teplotám .....	23
3.	Normy, dle kterých se posuzuje teplotní odolnost betonů a žárobetonů .....	24
3.1.	Normy .....	25
3.2.	Mechanické vlastnosti a změny betonu .....	25
3.2.1.	Cement .....	26
3.2.2.	Kamenivo .....	26
4.	Popis surovin, které jsou vhodné pro použití do betonů odolných proti vysokým teplotám .....	28
4.1.	Pojivo .....	28
4.1.1.	Hlinitanový cement .....	28
4.1.2.	GÓRKAL 40 .....	28
4.1.3.	GÓRKAL 50 .....	29
4.1.4.	GÓRKAL 50+ .....	29
4.1.5.	GÓRKAL 70 .....	29
4.1.6.	GÓRKAL 80 .....	29
4.1.7.	GÓRFLOW .....	29
4.2.	Plnivo .....	29
4.3.	Výztuž .....	30
4.4.	Vlákna .....	30
4.4.1.	Ocelová vlákna .....	31
4.4.2.	Polypropylenová vlákna .....	32
4.4.3.	Čedičová vlákna .....	34
4.5.	FIRESHIELD .....	35
5.	PRAKTICKÁ ČÁST .....	36
5.1.	Laboratorní zkoušky .....	36
5.1.1.	Zkouška sednutí (Abramsův kužel) .....	36
5.1.2.	Stanovení obsahu vzduchu .....	36
5.1.3.	Pevnost v tlaku .....	36

5.2.	Popis surovin vybraných receptur.....	37
5.2.1.	Beton s vysokopecním cementem – receptura č. 1 .....	37
5.2.2.	Žáruvzdorný beton – receptura č. 2.....	38
5.3.	Návrh zkušebních receptur .....	39
5.4.	Výsledky měření .....	40
5.4.1.	Zkoušky čerstvého betonu .....	40
5.4.2.	Zkoušky ztvrdlého betonu .....	42
5.5.	ZÁVĚR.....	51
6.	Seznam použité literatury .....	53
7.	Seznam obrázků .....	58
8.	Seznam tabulek.....	59
9.	Přílohy.....	60

## 1. Úvod

Vedle tradičních betonů v současnosti přichází na řadu i betony se speciálními vlastnostmi. Konstrukce se zvýšenou odolností vůči působení vysokých teplot přináší vyšší nároky na jednotlivé komponenty. Důležitou částí betonu se zvýšenou odolností proti vysokým teplotám je cement a jeho kvalita. Mezi ne méně důležité suroviny patří kamenivo, přísady, příměsi a výztuž. V současnosti jsou do betonu přidávány polypropylenová vlákna a ocelové drátky.

V diplomové práci jsou popsány podrobněji žárobetony a jejich druhy a použití, následně normy, dle kterých se posuzuje teplotní odolnost betonů a žárobetonů.

Praktická část obsahuje návrh a popis provedených dvou receptur, kde první je z klasického vysokopecního cementu a druhá je z hlinitanového cementu a kameniva na bázi lupku. Následně proběhlo ověření fyzikálně mechanických vlastností navrženého betonu a sledování změn při teplotách 200 °C, 400 °C, 600°C, 900 °C, 1 100 °C a 1 200 °C.

# TEORETICKÁ ČÁST

## 2. Betony s odolností proti vysokým teplotám

Žáruvzdorný materiál se dle mezinárodní normy definuje jako nekovový materiál nebo výrobek, jehož fyzikální a chemické vlastnosti umožňují použití při vysokých teplotách. Větší část žáruvzdorných materiálů tvoří oxidy a jejich kombinace. Můžou být také přítomné sloučeniny s kovalentní vazbou[1].

### 2.1. Žárovbetony

Žárovbeton je směs žáruvzdorných kameniv a pojiv, které jsou většinou dodávány v suchém stavu, používané po přidavku a smísení nejčastěji s vodou anebo jinou kapalinou. Hutní se litím, vibrační nebo bez vibrace, může se hutnit ještě pýchovací tyčí nebo dusáním. Směs pro vytvoření žárovbetonu se skládá z plniva různého chemického složení, následně z pojiva a přísady. Hlavní složkou je plnivo a jeho frakce o velikosti zrn nad 45  $\mu\text{m}$ , tvoří 65 – 75% z celkového složení. Tato frakce určuje základní vlastnosti žárovbetonu. Následně je přidávána jemnozrnná frakce, kterou tvoří zrna pod 45  $\mu\text{m}$ [1].

Velká část žárovbetonů je na bázi hlinitokřemičitých a hlinitých plniv. Obsahují  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$  v různých poměrech. Hutná kameniva mají nízkou pórovitost, vysokou pevnost a objemovou hmotnost.

Dle teploty použití se plniva pro žárovbeton rozdělují do tří skupin:

- DO TEPLoty 1 400 °C, kde patří nejčastěji pálený lupek a šamotová drť
- DO TEPLoty 1 400 – 1 600 °C, kde patří pálený kaolín, bauxit, pálené lupky s vyšším obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- NAD TEPLoty 1 600 °C, kde patří umělé vyrobené kameniva, jako je bílý korund, syntetický mullit a mullito korund

Do izolačních žárovbetonů se používají lehčená plniva, která mají objemovou hmotnost 400 – 1200  $\text{kg/m}^3$ , následně nižší pevnost a velkou pórovitost. Používá se vermikulit, keramzit nebo expandovaný perlit. Pěnošamot, šamot a lehčený kaolín se používá jako plnivo pro izolační žárovbetony vystavené středně tepelnému namáhání (1000°C). Pojivo v žárovbetonech je hlinitanový cement [1], [2].

## 2.2. Rozdělení žárobetonu

Žárobetony se rozdělují dle několika kritérií:

Podle způsobu aplikace:

- Žárobetony – ztekucené, běžné, s různým obsahem cementu
- Žáruvzdorné torkretovací materiály – izolační, hutné, plastické
- Žáruvzdorné tvarovatelné směsi – plastické materiály, dusací směsi
- Žáruvzdorné malty – tuhnoucí pouze na vzduchu, tuhnoucí výpalem
- Jiné netvarové žáruvzdorné výrobky – suché, ucpávkové směsi, vstříkovací, nátěry [3]

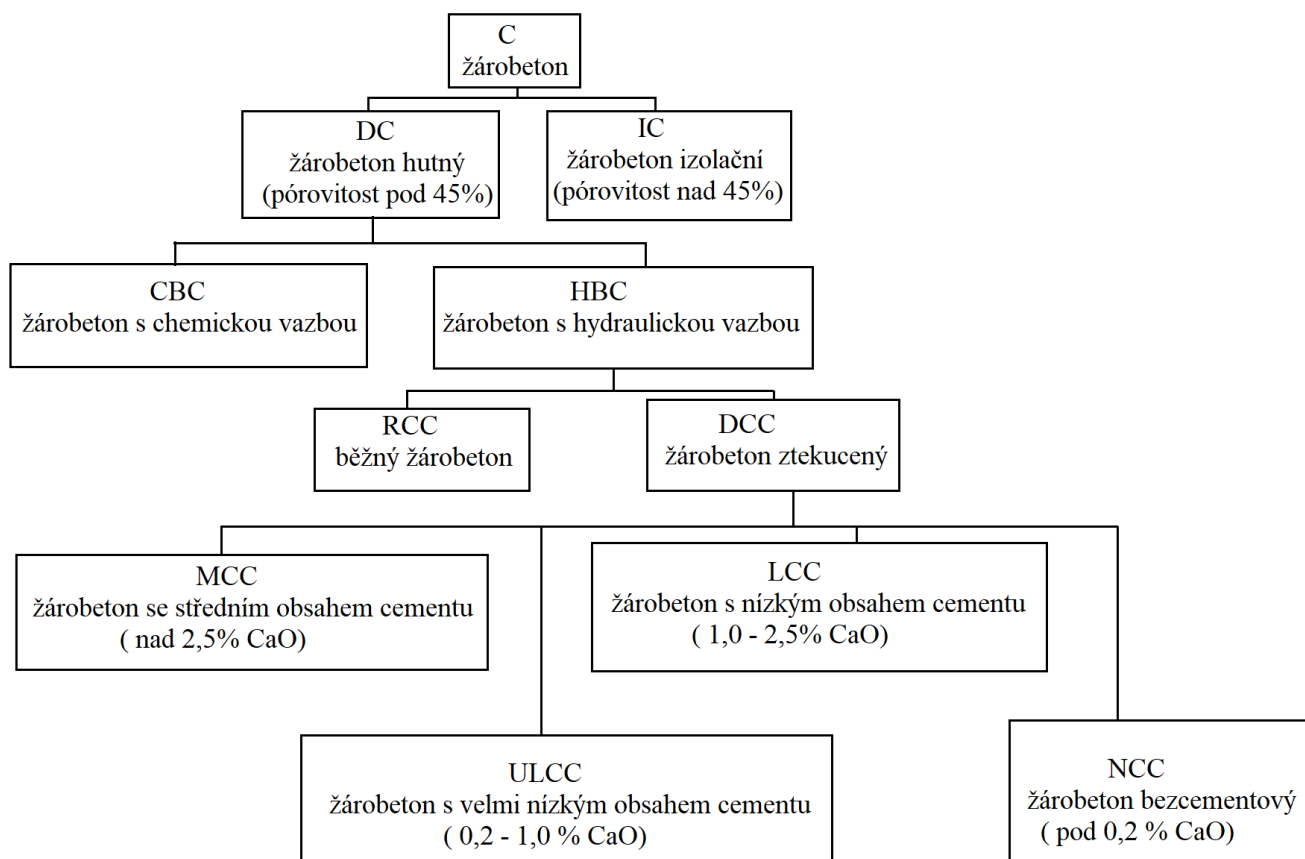
Podle klasifikační teploty:

- Tepelně odolný žárobeton -  $< 700^{\circ}\text{C}$
- Žároodolný žárobeton -  $700^{\circ}\text{C} - 1\ 100^{\circ}\text{C}$
- Žáruvzdorný žárobeton –  $1\ 100^{\circ}\text{C} - 1\ 500^{\circ}\text{C}$
- Vysoce žáruvzdorný beton -  $> 1\ 500^{\circ}\text{C}$ [4]

Podle chemického složení a základních surovin:

- Bazické výrobky – jsou založeny na obsahu slinuté, nebo tavené magnezie, dále slinutou dolimii nebo chromovou rudu
- Hlinitokřemičité výrobky – jsou založeny na hlinitokřemičitých plnivech, syntetických a přírodních vysocehlinitých surovinách, různých druzích korundu
- Speciální výrobky – jsou založeny na obsahu oxidových a neoxidových ostriv, nejčastěji používaný je karbid křemíku, křemičitan a oxid zirkoničitý
- Výrobky obsahující uhlík – jsou výrobky z předcházejících bodů, které obsahují nejméně 1% uhlíku, který je vnášen v pevné formě nebo jako kapalina [4]

## 2.3. Typy žárobetonu



Obrázek 1: Druhy žárobetonu [1]

### 2.3.1. DC - Hutné žárobetony

Hutné žárobetony se používají od 1400 do 1700 °C a mohou mít hydraulickou nebo chemickou vazbu. Pro tento typ se používá přírodní kamenivo: andezit, čedič nebo diabas. Pro žárobetony, které musí odolávat teplotám nad 900 °C, se používá umělé kamenivo jako je drcený šamot, bauxit, korund anebo chromit. Objemová hmotnost je vyšší než 1 800 kg/m<sup>3</sup>[5].

### 2.3.2. IC – Izolační žárobetony

Izolační žárobetony se používají pro přípravu lehčených monolitů a pro výrobu tvarových pálených materiálů. Z tohoto důvodu se jako plnivo používá lehčené kamenivo jako je expandovaný perlit, drť z lehčeného šamotu, duté kuličky korundu a duté kuličky na bázi systému SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Jako pojivo se používá cement kvůli hydraulické vazbě. Dále fosforečná pojiva, vodní sklo a křemičitá pojiva. Cement se osvědčil hlinitanový

s obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  do 40 %, pro teploty kolem 1400 °C se používají cementy vysocehlinitanové s obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nad 40 %. Portlandský cement se používá pro teploty kolem 700 °C[5].

Pro využití žárobetonu do nízkých teplot je vhodný perlitový beton o objemové hmotnosti 400 – 800  $\text{kg/m}^3$ , s pevnostmi 1 – 4,5 MPa a měrnou tepelnou vodivostí 0,10 – 0,19  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Perlitový beton se používá do 800 °C [5].

Pro použití do vyšších teplot (1400°C) se používá jako plnivo drť z lehčeného šamotu. Kuličkový korund a kvalitní vysocehlinitanový cement se používá pro ještě náročnější podmínky. Objemová hmotnost izolačních materiálů se pohybuje kolem 1 800  $\text{kg/m}^3$ [5].

### **2.3.3. CBC – Žárobetony s chemickou vazbou**

Žárobetony s chemickou vazbou se rozdělují podle druhu vazby na:

- Žárobetony s organicko – chemickou vazbou: jako pojivo je organicko – křemičitá sloučenina, umělá pryskyřice nebo smoly
- Žárobetony s bezcementovou anorganickou vazbou: obsah  $\text{CaO} < 0,2$  %, vazby s vodním sklem, fosfátová, sol – gel
- Žárobetony s bezcementovou vazbou: jsou založeny na hydrotermální vazbě (C-S-H) [5].

### **2.3.4. HBC – Žárobetony s hydraulickou vazbou**

Tento typ žárobetonu se dělí na běžné a ztekucené, které se dále dělí na žárobetony se středním, nízkým, velmi nízkým a žádným obsahem cementu. Hydraulická vazba je tvořena hlinitanovými cementy[5].

### **2.3.5. RCC – Běžný žárobeton**

Tento typ běžných žárobetonů obsahuje obvykle 15 – 30 hm. % cementu a 8 – 20 hm. % záměsové vody. Běžný žárobeton se tak vyznačuje jednoduchou přípravou žárobetonové směsi [5], [6].

Pórovitost u běžných žárobetonů velmi snižuje jeho pevnosti a na jejich přípravu je potřeba vysoká spotřeba vody. Za nízkou pórovitost žárobetonu může hlinitanový gel vzniklý při průběhu ošetřování. Otevřená pórovitost u běžných žárobetonů, která je vysušená při 110 °C, se pohybuje kolem 17 % [5], [6].

Menší podíl pórovitosti je způsoben zadrženými vzduchovými bublinami, ale větší podíl pórovitosti je vyvolán záměsovou vodou, která při zahřívání hydraulické pojivo nejprve modifikuje a následně ji ztrácí dehydratačním procesem. V průběhu modifikace struktury se mění rozložení velikostí póru a pórovitost pak velmi roste. Z tohoto důvodu pórovitost vypálených materiálů dosahuje vysokých hodnot až 23 % [5], [6].

Další z nevýhod běžných žárobetonů je vysoký obsah vápníku. Vápník podporuje vznik tekutých skelných fází při vysokých teplotách prostřednictvím eutektické kapaliny. Kapalina tedy zůstává amorfní ve formě skla a ovlivňuje odolnost proti korozi nebo žáruvzdornosti [5], [6].

### **2.3.6. DCC – Žárobeton ztekucený**

Díky ztekucení představují žárobetony snadnější ukládání. Tekutost je způsobená přidávkou dispergačních nebo deflokulačních činidel. Díky činidlům dojde k pozitivnímu vlivu na vlastnosti žáromonolitu.

Ztekucený žárobeton lze dále dělit na žárobetony se středním, nízkým, velmi nízkým obsahem cementu a na bezcementové[1].

### **2.3.7. MCC – Žárobetony se středním obsahem cementu**

Tyto žárobetony obsahují > 2,5 % CaO, což znamená, že obsah cementu je 6 – 15 %.

Při přidání ztekucovadel do toho typu žárobetonu se sníží množství záměsové vody, a tím se zvýší mechanické vlastnosti a hutnost žáromateriálu, protože množství vody negativně ovlivňuje množství pórů [5].

Díky snížení množství záměsové vody se docílí zvětšení mechanické pevnosti, rozměrové stability, abrazi a odolnosti proti korozi. Z tohoto důvodu se tyto žárobetony používají pro náročnější provozní podmínky.

Zpracování žárobetonu se středním obsahem cementu se provádí nejčastěji vibrolitím[5].

### **2.3.8. LCC – Žárobetony s nízkým obsahem cementu**

Cementy v žárobetonech zhoršují žárové vlastnosti materiálu, a tím snižují teplotu jejich použití. Dochází k tomu kvůli vzniku taveniny již při nízkých teplotách. V cementu obsažené CaO reaguje při vyšších teplotách s SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v kamenivu, a tím vzniká kapalná fáze se složením galenitu a anortitu s nízkými teplotami tání. Z tohoto důvodu



žárovětony s nízkým obsahem cementu obsahují pouze 1,0 – 2,5% CaO, což odpovídá 3 – 8 % cementu.

U žárovětonu s nízkým obsahem cementu je nutné dodržet podíly jemných oxidických (korund) a křemičitých (převážně SiO<sub>2</sub>) prášků, které v žárovětonu zajišťují tixotropní chování a napomáhají při přípravě a zpracování směsi. Použitý druh cementu významně ovlivňuje vlastnosti žárovětonů s nízkým obsahem cementu.

Žárovětony s nízkým obsahem a s velmi nízkým obsahem cementu se na monolit zpracovávají pouze vibrací, a to z důvodu tixotropního chování směsi s velmi nízkou vlhkostí. Zvýšení konzistence směsi se docílí zvýšením jeho vlhkosti, ale tím se sníží pevnost monolitu. Pro složitější tvary, které se špatně vibrují, se vyvinuly tzv. samotekoucí žárovětony, které mají změnu v křivce zrnitosti. Obsahují menší podíl jemných částic a speciální deflokulační činidlo. Obsah vody je pouze 4,5 – 7,5 %. Dosažené pevnosti jsou srovnatelné s žárovětony s nízkým obsahem cementu [5].

### **2.3.9. ULCC – Žárovětony s velmi nízkým obsahem cementu**

U tohoto typu žárovětonu obsah cementu nepřekračuje 3% a obsah CaO se pohybuje od 0,2 – 1,0 %. Vlastnosti žárovětonu s velmi nízkým obsahem cementu jsou podobné jako u žárovětonu s nízkým obsahem cementu. Při zachování dobrých vlastností je důležité, abychom použili velmi malé množství záměsové vody [1],[5].

### **2.3.10. NCC – Žárovětony bezcementové**

Tento typ žárovětonu se zpracovává při nízké vlhkosti a to cca 5%. Množství CaO je < 0,2 %. Použití přísad (amorfní SiO<sub>2</sub>, hydratizované oxidy hlinité) a disperzních látek, které podporují ztekucení, dosáhneme tixotropního chování žárovětonu. Nejvíce jej ovlivňuje jemná frakce, která tvoří 25 – 35 % z celkového složení. Jemná frakce o velikosti < 45µm se nazývá matrix. Tato frakce ovlivňuje hustotu uložení částic, množství záměsové vody, dobu tuhnutí a pevnost výsledného žárovětonu [5].

Z technologického hlediska je velmi důležité dodržení teploty zpracování žárovětonu, která se pohybuje v rozmezí od 18 do 28°C. Jemná frakce zabezpečuje zvýšenou odolnost proti otěru, vyšší lomovou houževnatost a zbytkovou pevnost za vysokých teplot po namáhání teplotními změnami. Bezcementové žárovětony obsahují místo cementů látky vytvářející chemickou vazbu, hlavně tzv. anorganické polymery. Způsob jejich zpracování ale zůstává stejný jako při žárovětonech obsahující cement.

Souběžně s materiálovým vývojem nových typů žáromonolitů probíhá vývoj techniky instalace, protože tradiční způsoby nejsou zcela vhodné pro nové směsi. Podmínkou pro dokonalou přípravu tixotropních směsí je intenzivní míchání s přesně daným množstvím vody. Ukládání betonu probíhá zásadně s použitím vibrace, s výhodou při vysokých frekvencích, která pozitivně ovlivňuje zhutnění [5], [7].

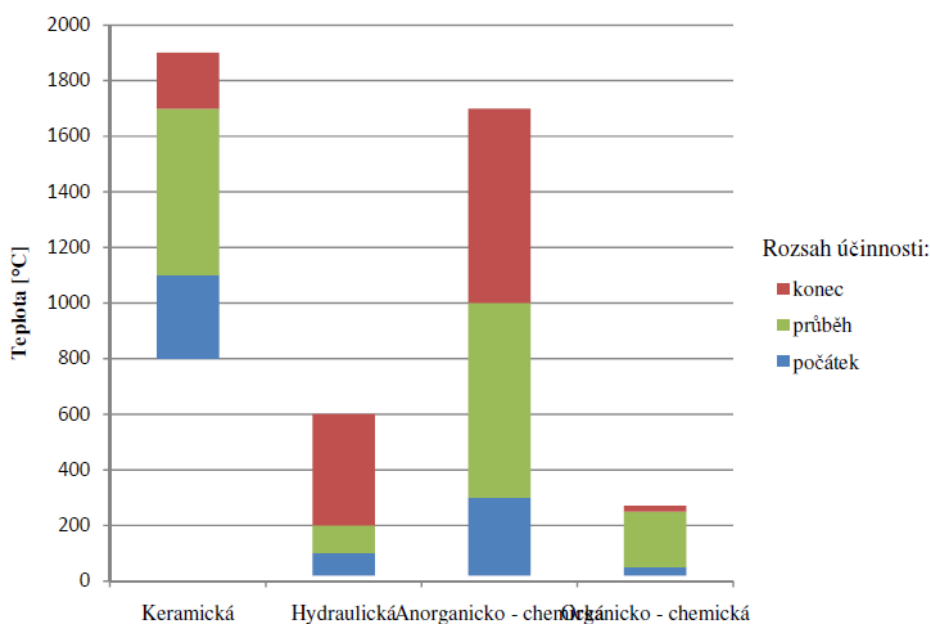
## 2.4. Druhy vazeb netvarových žáruvzdorných materiálů

Druhy nejdůležitějších vazeb netvarových žáruvzdorných materiálů:

- Keramická vazba
- Hydraulická vazba
- Anorganicko – chemická vazba
- Organicko – chemická vazba[1], [4], [5].
- 

**Tabulka 1: Teplotní rozsah působení jednotlivých druhů vazby**

Typ vazby	Teplotní rozsah účinnosti [°C]	
	Počátek	Konec
Keramická	800 - 1 100	1 700 - 1 900
Hydraulická	20 - 100	200 - 600
Anorganicko - chemická	20 - 300	1 000 - 1 400
Organicko - chemická	20 - 50	< 250



**Obrázek 2: Teplotní účinnost typu vazby**

### 2.4.1. Keramická vazba

Ke zpevnění materiálu dochází zvyšováním teploty a při nižších teplotách vznikají vazby, které se působením teploty přeměňují na keramickou vazbu. Vysokoteplotní reakce probíhají v pojivu a mezi pojivem a kamenivem.

Hlavní reakce, která vede ke vzniku keramické vazby, je dehydratace hydraulické vazby, případně termická přeměna chemické vazby a reakce mezi kamenivem a pojivem. Při teplotě cca 1 100°C dochází ke slinování. Teplotu je možné snížit obsahem nečistot nebo přísad, které napomáhají ke slinování, což se může nevýhodně odrazit na únosnosti materiálu v žáru [5].

Čím nižší je teplota slinování žáruvzdorné hmoty, tím je nižší maximální teplota použití. Použitá zrna o větší velikosti reagují pouze na povrchu, proto je prvkem těchto reakcí především jemná frakce kameniva. Reaktivita a jemnost jemné frakce musí být nastavena tak, aby za nízkých teplot reagovala s pojivem bez výskytu kapalně fáze – taveniny. Jemná frakce má velmi zásadní vliv na velikost roztažnosti a smršťování, a tím i na tvorbu trhlin v keramické vazbě [5].

### 2.4.2. Hydraulická vazba

Cementy, které mají hydraulickou vazbu, tuhnou a následně získávají požadované vlastnosti za normální teploty. V žáruvzdorném průmyslu se používá pouze hlinitanový cement se souvisejícími modifikacemi. Kvůli těmto technologickým vlastnostem se portlandský cement nepoužívá [8].

- Snížení tepelné odolnosti těchto žárobetonů z důvodu obsahu značného množství CaO, které se v soustavách s SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> chová jako tavicí oxid.
- Pokles pevnosti, kdy se v průběhu postupného zahřívání ztrácí vázaná voda v křemičitanech a hlinitanech vápenatých. Při teplotě 550°C odchází vázaná voda v Ca(OH)<sub>2</sub> a vzniká volné CaO. Při ochlazení agregátu nebo při odstávce volný CaO zreaguje zpět s vodou na Ca(OH)<sub>2</sub>, a to způsobí značné zvětšení objemu o 80 – 150%. Vzniklé krystalizační tlaky beton zcela rozruší.

Z výše uvedených bodů vidíme, že nám chemická povaha složení neumožňuje zvýšit teplotní odolnost a v druhém bodě můžeme pokles pevnosti ovlivnit stabilizací přísadkem jemně mletých látek, které můžeme ve směsi stejnoměrně rozptýlit jako cement.

Hlinitanové žárobetony obsahují hlinitanový cement, jehož hlavními minerály je  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ . Díky obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v hlinitanovém cementu vzniká vysoká žáruvzdornost a po výpalu nevzniká volné  $\text{CaO}$  – není jej třeba zapotřebí vázat [8].

### **2.4.3. Anorganicko – chemická vazba**

Anorganická vazba je tvořena anorganickými sloučeninami, které mají funkci zpevňovat materiál v rozpětí od pokojových teplot do teploty kolem  $300^\circ\text{C}$ . Probíhají podle druhu vazby rozličné chemické reakce. Nejlépe se osvědčily fosforečnany hlinité, které se postupně mění na  $\text{AlPO}_4$ .

Další časté vazby jsou na bázi rozpustných křemičitanů alkalických kovů (vodní sklo), které působením kyselých reagujících látek, jako je např.  $\text{CO}_2$  ve vzduchu, vzniká reaktivní kyselina křemičitá a její polykondenzáty, které fungují jako tvrdící činidlo. Zvýšeným obsahem  $\text{CO}_2$  nebo přidávkem fluorokřemičitanů je stimulováno tvrdnutí. Nevýhodou však je, že alkálie snižují žárovou odolnost [5].

### **2.4.4. Organicko – chemická vazba**

Organická vazba je tvořena látkami organickými, jako je sulfinový louh a deriváty celulosy. Při ohřátí na teplotu  $250^\circ\text{C}$  dochází k porušení vazby, což má za následek pokles pevnosti. Z tohoto důvodu se receptury často skládají z anorganické vazby, aby nevzniklo značné teplotní rozmezí o nízké pevnosti před vznikem keramické vazby.

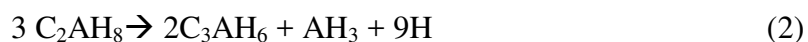
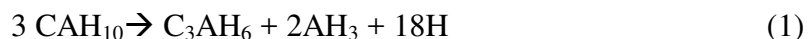
Kromě tekutých živic je možné použít různé kombinace organických pojiv, jako je například pevná smola nebo novolak. Jde většinou o hmoty na vodní bázi, které obsahují uhlík, a ty vytvářejí při vyšších teplotách vazbu. Hmoty lze použít na opravu vyzdívek obsahujících uhlík, protože má k nim velmi dobrou přilnavost [4].

## **2.5. Konverze**

Ve 30. až 60. letech minulého století byl v některých případech používán hlinitanový cement pro konstrukční účely. Hlavním důvodem použití byl rychlý nárůst počátečních pevností. U konstrukcí, kde byl použit, bohužel docházelo k postupnému masivnímu poklesu pevnostních charakteristik během několik let, které vedly ke ztrátě stability konstrukce.

Příčinou poklesu pevnosti betonu na bázi hlinitanových cementů je pozvolná přeměna (konverze) kalciumhydroaluminátů vzniklých hydratací cementu. Konverze může být urychlena propustností betonu, zvýšenou teplotou prostředí a vlhkostí atd [42].

Většina hydratačních produktů se vytvoří během 24 hodin. Výsledkem je velmi hutná a pevná cementová matrice.



Uvedené rovnice (1), (2) znázorňují konverzi, která probíhá pomalu, někdy i mnoho let při teplotě 20 °C, ale s rostoucí teplotou roste i rychlost reakce. Při teplotě 50 °C proběhne reakce během několika hodin. V průběhu konverzního procesu hydráty  $\text{CAH}_{10}$  a  $\text{C}_2\text{AH}_8$  uvolňují vodu, která vyplňuje volné místo, které vzniklo tvorbou produktů s menším molárním objemem. Zmenšením molárního objemu roste poróznost a propustnost a ty vedou ke značnému snížení pevnosti[43].

V České republice je zakázáno použití hlinitanového cementu pro konstrukční beton.

## 2.6. Netvarové žáruvzdorné materiály

Netvarové žáruvzdorné materiály se skládají ze žáruvzdorných surovin o zadané zrnitosti a pojiva. Jsou dodávány v sypkém stavu a zpracovávají se na místě jako vyzdívka agregátu, která je následně vysušená a vypálená.

Z těchto surovin je možné vyrobit hutné výrobky s pórovitostí pod 45%, nebo výrobky izolační s pórovitostí nad 45% [6].

Netvarové žáruvzdorné materiály často nahrazují tradiční vyzdívky z cihel, bloků nebo prefabrikátů. Velkou výhodou jejich použití je rychlost a metoda zhotovení monolitické vyzdívky beze spár, která má dobrou odolnost proti náhlým změnám teplot a zvýšenou tepelně – izolační schopnost oproti vyzdívkám z cihel.

Netvarové žáruvzdorné materiály se podle zpracování dělí na tři třídy:

- Směsi pro opravy a výrobu monolitických konstrukcí
- Materiály pro spárování a pokládání
- Materiály nástřikové a pro povrchovou ochranu

Netvarové materiály pro výrobu monolitických konstrukcí mají oproti tvarovým žáruvzdorným materiálům tyto výhody:

- Krátká doba výroby
- Rychlejší instalace

- Lepší odolnost proti změnám teplot

Nevýhody netvarových žáruvzdorných materiálů jsou spojeny s výrobními postupy, jako je sušení a následný výpal. Proto je důležité, aby výrobní procesy se prováděly dle technologického listu daného materiálu[5].

## **2.7. Požární odolnost**

Požární odolnost betonu je definována jako schopnost zachovat původní funkci betonu, udržení statických vlastností, ochránění ocelových výztuží a přilehlé okolí chránit před toxickými plyny v případě vzniku požáru.

Při poškození betonu požárem se poškození nepovažuje za degradační mechanismus, ale za nehodu způsobenou vnějšími vlivy. Síly, které způsobují explozivní drolení při vystavení betonového prvku požáru, souvisí s mikrostrukturou stejně jako v případě degradačních mechanismů. Hlavní rozdíl je však ten, že k poškození dochází v mnohem kratším časovém intervalu. Nejdůležitějším faktorem při způsobení explozivního drolení je zřejmě vlhkost a mikrostruktura materiálu. Voda, která je obsažena v betonu, se mění na vodní páru, což při vyšších teplotách znamená růst tlaku. V případě, že je mikrostruktura betonu otevřená, tzn. vysoký vodní součinitel, vodní pára může poměrně rychle unikat a snižuje se tlak v betonu. V důsledku vzniku vysokého vnitřního tlaku dojde k odtržení malé povrchové vrstvy betonu, tzv. k explozivnímu drolení [9].

## **2.8. Ohnivzdornost**

Budovy jsou navrhované tak, aby byly schopné odolávat účinku požáru po dobu nutné evakuace lidí [10]. Beton nesmí přispívat k dalšímu šíření požáru a musí splňovat požadavky třídy A1 [11].

## **2.9. Požární bezpečnost**

Požární bezpečností se rozumí souhrn stavebních, technických a organizačních opatření k zabránění vzniku požáru a lze ji rozdělit na dva základní pilíře, a to na pasivní a aktivní požární ochranu [12].

Pasivní požární ochrana je řešena dle projektu konstrukčně a dispozičně. Jedná se o členění objektu do požárních úseků, použití vhodných hmot, výrobků a stavebních konstrukcí z hlediska jejich požární odolnosti a hořlavosti. Řeší se únikové cesty či evakuační cesty pro zvířata a vybavení zásahových cest pro jednotky požární ochrany.

Aktivní požární ochrana představuje schopnost bezpečnostních zařízení jako celku v budově detekovat účinky požáru, následně likvidovat (případně snižovat) účinek vznikajícího požáru v jeho počáteční fázi. Nejčastěji se jedná o elektrickou požární signalizaci, zařízení pro obvody kouře a tepla, stabilní hasicí zařízení, požární větrání únikových cest a zařízení pro autonomní detekci a signalizaci požáru [13], [16].

## **2.10. Použití betonu s odolností proti vysokým teplotám**

U betonu s odolností proti vysokým teplotám je důležité znát, jakou teplotu bude muset betonový výrobek během svého použití vydržet. Je samozřejmě odlišné složení pro beton určený pro vyzdívku pece a jiné složení bude mít beton určený pro stavbu zahradního krbu nebo grilu. Zda bude vystaven přímému kontaktu s ohněm, anebo bude od přímého plamene oddělen izolační přepážkou atd [14].

Betony, kde jako pojivo je použitý portlandský cement, jsou schopné vydržet teplotu do 1 000 °C, ale podmínkou je použití vhodného kameniva. Pro vyšší teploty je nutné použít speciální cementy, tzv. hlinitanový cement anebo jiná pojiva. Chování betonu v závislosti na teplotě je popsáno v tabulce č.2.

Beton, který je vystaven vysokým teplotám, podléhá degradaci způsobené rozkladem hydratačních produktů betonu, ale rovněž rozpadem kameniva vlivem vysoké teploty. Proto při návrhu je nutné volit také složky, které těmito dvěma způsobům degradace podléhají co nejméně, anebo až při velmi vysokých teplotách.

Pro výrobu hutných žárobetonů s objemovou hmotností vyšší než 1 500 kg/m<sup>3</sup> vystaveným teplotám do 700°C vystačí hutné přírodní kamenivo. A pro žárobetony vystavené vyšší teplotě než 700°C je nutné použít umělé přírodní kamenivo. Přírodní kamenivo při vyšších teplotách nesmí měnit své mechanické vlastnosti a nesmí se vlivem vysokých teplot smršťovat. Nevhodné jsou žula a křemenná kameniva. Křemenná kameniva vlivem vysokých teplot beton trhá a dochází k prudkým objemovým změnám [14].

**Tabulka 2: Změny, ke kterým dochází v betonu při zahřívání [14]**

TEPLOTA °C	CHOVÁNÍ BETONU	
20 - 80	pomalá ztráta kapilární vody	explosivní odprýskávání
100	únik páry	
80 - 150	dehydratace ettringitu	
150 - 170	rozklad sádry $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
300	praskání křemičitého kameniva	
400	rozklad portlanditu	výskyt trhlin
500	změna krystalové fáze v kamenivu a písku	
700	rozklad uhličitanu vápenatého uvolňováním oxidu uhličitého	
1 300	celkový rozklad betonu, tavení některých složek	

### **3. Normy, dle kterých se posuzuje teplotní odolnost betonů a žarobetonů**

Většina členských států Evropského společenství v roce 1991 přijala Směrnice Rady o sblížení zákonů a dalších správních a právních předpisů členských států, které se týkají výrobku. Na uvedenou Směrnici navazují dokumenty, které jsou dále tříděny dle základních požadavků na stavby a výrobky. Dokumenty jsou uvedeny níže.

- 1) Mechanická odolnost a stabilita
- 2) Požární bezpečnost
- 3) Hygiena, ochrana zdraví a životního prostředí
- 4) Bezpečnost při užívání
- 5) Ochrana proti hluku
- 6) Úspora energie a ochrana tepla
- 7) Udržitelné využívání přírodních zdrojů



Všechny závazné požadavky na stavby a výrobky jsou v ČR zpracovány do Stavebního zákona[15](§ 156 ods. 2 zákona č. 183/2006 Sb.). Základním cílem navrhovaných opáření je dodržet a zaručit pro určitou dobu stabilitu a únosnost nosných požárně dělicích konstrukcí. Zajistit bezpečný únik osob a bezpečnou evakuaci zvířat popřípadě majetku. Umožnit zasahujícím jednotkám požární ochrany účinný protipožární zásah. Dalším cílem je zamezit šíření požáru uvnitř objektu a zabránit přenesení požáru z hořícího objektu na protilehlý nebo přilehlý objekt.

Normové požadavky řeší celou problematiku požární bezpečnosti stavebních objektů a realizace zasahuje do celého stavebního díla. V návrhu požárních opatření se podílí i požární odolnost stavebních konstrukcí. Požární odolnost dělicích a nosných prvků může být v rámci prováděných zkoušek určena pomocí rozdílného mechanického působení. ČSN 13501-2 zavedla požární scénáře, které stanovují pro použitý prvek jednu nebo více úrovní tepelného namáhání, tzn. velikost zkušebního zatížení v poměru k únosnosti prvku při normální teplotě [11], [17].

### **3.1. Normy**

Aktuální znění norem týkajících se odolnosti betonu vůči vysokým teplotám budou uvedeny níže.

Informace, které se týkají všeobecných požadavků, zatížení konstrukcí vystavených požáru a navrhování, jsou uvedeny v normách ČSN EN 1991 – 1- 2 Eurokód 1 [19] a ČSN EN 1992 – 1- 2 [20].

Zkoušení požární odolnosti, stanovení požární odolnosti obvodových stěn a reakce stavebních výrobků na oheň jsou uvedeny v normách: ČSN EN ISO 1182 [24], ČSN EN ISO 1716 [26], ČSN EN ISO 11925-2 [25], ISO 834-1: 1999 [27] a ČSN EN 13823 + A1 [23].

Požární klasifikace stavebních výrobků, obecné aspekty designu struktury vystavené působení ohně a požárně technické vlastnosti hmot jsou uvedeny v normách: ČSN EN 13501-1+A1 a 2 [22] a ČSN 73 0863 [21].

### **3.2. Mechanické vlastnosti a změny betonu**

Tato kapitola je zaměřena na jednotlivé složky betonu s odolností proti vysokým teplotám a jejich chování při vlivu vysokých teplot.

### 3.2.1. Cement

Při působení vysokých teplot na cementový tmel dochází k odpařování několika druhů vázané vody, která je přítomná v materiálu. Voda se ze zvyšující teplotou z materiálu postupně uvolňuje. Jako první z cementového tmelu odchází voda volná prostřednictvím kapilár, ze zvyšující se teplotou se uvolňuje voda chemicky vázaná.

Když je cementový tmel zahříván ve vlhkém a uzavřeném prostředí, nastane hydrotermální reakce, která způsobí změny v mikrostruktuře z hlediska chemického a fyzikálního. Tato reakce UTB (urychlování tvrdnutí betonu) je známá v technologii prefabrikace, kde se materiál vystaví působení vysokého tlaku a vysoké teploty, a tím se dosáhne hydratačních změn v mikrostruktuře. Tato reakce vede ke zvýšení pevnosti cementového tmelu. Fázové změny závisí na různých aspektech, a to na složení cementu, podílu jemnosti krystalů nebo křemičitých úletů, poměru Ca a SiO<sub>2</sub> a na úrovni dosažené teploty a tlaku. Tato reakce se v současnosti nepoužívá, protože je ekonomicky nákladná.

Při teplotách 100 °C se jako první rozkládá ettringit, v CSH gelu je dehydratace postupná a probíhá už od začátku zahříváním materiálu. Struktura cementové pasty je částečně narušená již při teplotě 105°C, což je standardní teplota pro sušení materiálu. Při zahřátí cementové pasty na teplotu 500 – 550°C obsah portlanditu rychle klesá, protože se rozkládá podle následující reakce (3):



Mechanické vlastnosti cementové pasty v materiálu jsou velmi silně ovlivněny chemickými vazbami a soudržností sil mezi „listy“, které jsou tvořeny CSH gelem. Přibližně 50 % pevnosti cementové pasty závisí na soudržnosti sil [18], [33].

### 3.2.2. Kamenivo

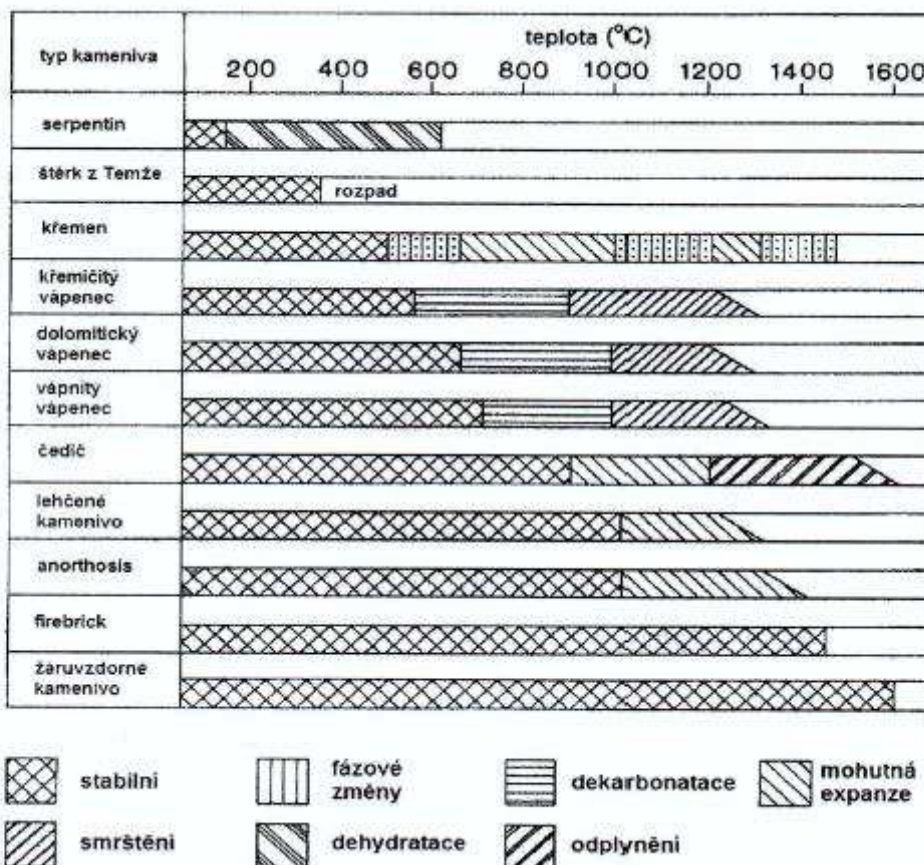
Kamenivo v betonech s odolností proti vysokým teplotám má v návrhu čerstvého betonu velmi důležitou úlohu, jelikož zabírá 60 – 80 % objemu betonu[18].

Jednotlivá kameniva mají rozdílné reakce na teplo a jejich fyzikálně – chemické změny závisí na jeho typu. Velmi důležitým faktorem pro teplotně zatěžovaný beton je fyzikální a chemická stabilita kameniva. Volba kameniva je proto důležitým faktorem pro určování tepelných vlastností betonu při požáru [18].

Kamenivo s rostoucí teplotou zvyšuje svůj objem, a proto jeho teplotní roztažnost je důležitou charakteristikou z hlediska jeho reakce na teplotu. O tepelné roztažnosti kameniva rozhodne jeho mineralogické složení, které se pro všechny materiály liší [18].

V žáru se dobře osvědčují vápence, protože vypalování při teplotě nad 500 °C se omezuje jen na povrchové vrstvičky, které velmi dobře chrání jádro a mají malé objemové změny [39].

Zahříváním betonu se objem kameniva zvětšuje a souběžně dochází ke smrštění cementového tmelu, který ho obklopuje. Vysoký podíl kameniva v betonu, který je důležitý pro jeho stabilitu, způsobuje praskání. K praskání dochází v důsledku rozdílu tepelného přetvoření mezi smršťujícím se cementovým tmelem a expandujícím kamenivem [39].



Obrázek 3: Procesy a stabilita probíhající v průběhu zahřívání kameniva

## **4. Popis surovin, které jsou vhodné pro použití do betonů odolných proti vysokým teplotám**

### **4.1. Pojivo**

Pro betony odolné proti vysokým teplotám je nejméně vhodným hydraulickým pojivem čistý portlandský cement, jelikož podléhá rozpadu po ztrátě chemicky vázané vodě v hydraulických produktech. Vhodnější variantou je použití cementy směsné. Cementy směsné obsahují méně portlandského slínku a více příměsí na bázi strusky, popílku atd [28].

#### **4.1.1. Hlinitanový cement**

Cementy hlinitanové mají nejlepší odolnost vůči vysokým teplotám. V současné době mají hlinitanové cementy velmi omezené použití, uplatňují se zejména pro speciální účely, jako je monolitická vyzdívka pecí. Použití hlinitanového cementu pro konstrukční účely bylo ve stavebnictví v ČR zakázáno. Důvodem byla ztráta pevnosti a poróznosti, která vznikla kvůli přeměně metastabilních fází  $CAH_{10}$  a  $C_2AH_8$  při teplotách nad  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  na stabilní kubickou formu  $C_3AH_6$ . Beton vyrobený z hlinitanového cementu by měl obsahovat alespoň  $400\text{ kg/m}^3$  tohoto cementu a vodní součinitel by neměl překročit hodnotu  $w = 0,4$ . Takto vytvořena cementová směs je natolik hutná, že vykompenzuje zvýšenou poróznost typickou pro vysokocehlinitanové betony při teplotě nad  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dostatečná vysoká ochrana kovových výztuží před korozi je zajištěna i přes nepřítomnost hydroxidu vápenatého. Mísení portlandského cementu a hlinitanového cementu je rovněž zakázáno, z důvodu vzniku portlanditu v portlandském cementu, který v kombinaci s hlinitanovým cementem způsobuje příliš rychlé tuhnutí směsi [28],[29].

#### **4.1.2. GÓRKAL 40**

GÓRKAL 40 se používá pro instalaci topných zařízení provozní teploty až  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Je možné ho použít na vyzdívku krbů a komínů, obložení pecí a na provádění oprav. Použití tohoto cementu výrazně prodlužuje životnost těchto zařízení.

Cement GÓRKAL 40 dobře obstál při použití při nízkých teplotách, je možné ho použít i při  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dobře odolává v chemicky agresivním prostředí (chloridy, sírany, mořská voda). Zajišťuje úplnou ochranu výztuže a jeho charakteristická vlastnost je rychlý nárůst mechanické pevnosti [29].

### **4.1.3. GÓRKAL 50**

GÓRKAL 50 je hydraulické pojivo, které se používá pro konstrukce v průmyslu. Pozitivní vlastnosti cementu GÓRKAL 50 je velmi rychlý nárůst pevnosti (80% po 12 hodinách od namíchání čerstvého betonu) a krátký čas hydratace. Jeho dobré mechanické vlastnosti jsou díky stabilnímu složení [29].

### **4.1.4. GÓRKAL 50+**

Cement GÓRKAL 50+ má podobné vlastnosti a použití jako cement GÓRKAL 50. Jediný rozdíl je nízký obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  v cementu GÓRKAL 50 je  $< 10\%$  a u cementu GÓRKAL 50+ je obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 3\%$  [29].

### **4.1.5. GÓRKAL 70**

Cement GÓRKAL 70 je spojovací materiál pro žáruvzdorné výrobky. Použití má zejména v chemickém průmyslu. Nulový obsah přísad a modifikátorů způsobuje, že riziko negativní reakce s ostatními složkami směsi je velmi malé.

Pro potřebnou vysokou hydraulickou aktivitu se doporučuje typ cementu GÓRKAL 70F, který má vyšší obsah oxidu hlinitého [29].

### **4.1.6. GÓRKAL 80**

GÓRKAL 80 je cement s vysokým obsahem oxidu hlinitého (79 – 82%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Používá se v různých žáruvzdorných materiálech a funguje rovněž dobře v redukční atmosféře [29].

### **4.1.7. GÓRFLOW**

GÓRFLOW je přísada pro žáruvzdorné hydraulická pojiva. Je založen na cementu GÓRKAL 80, který má 79 – 82% obsah oxidu hlinitého. GÓRFLOW zajišťuje vynikající tekutost malt s různým obsahem pojiva. Jeho vlastnosti jsou viditelné při vibračních a samonivelačních metodách [29].

## **4.2. Plnivo**

U plniva je velice důležité, aby při vyšších teplotách neměnilo své mechanické vlastnosti, a nesmí se vlivem vysoké teploty smršťovat. Mezi nevhodné kamenivo patří žula a křemenná kameniva. Není vhodné používat kameniva s různou tepelnou vodivostí. Vzhledem k reakci kameniva na vysoké teploty je do betonu vhodné použít kamenivo s nízkou tepelnou roztažností a zanedbatelným zbytkovým přetvořením, tyto kritéria

splňuje právě vápencové kamenivo. Pro betonové konstrukce, kde je teplota vyšší než 700 °C, je potřeba použít umělé kamenivo [18].

### **4.3. Výztuž**

Při teplotě zhruba 500 °C ocel ztrácí svou pevnost v tahu, pak dochází k její rekrytalizaci. Díky vysoké tepelné vodivosti výztuže může teplota v dlouhých částech výztuže snadno dosáhnout kritické teploty 500 °C a přivodit riziko kolapsu. Tento druh porušení se může výrazně zredukovat zvýšením tloušťky krytí. Tzn. čím větší tloušťka krytí, tím je riziko nižší, že se trhlinky dostanou až k ocelové výztuži a dojde ke kolapsu.

Pro požár o teplotě 500 °C se navrhuje krytí v tloušťce 20 mm, což je tloušťka pro výdrž 50 – 70 minut. Tloušťka krytí výztuže 30 mm je pro výdrž 80 – 110 minut, krytí 40 mm je pro výdrž 120 – 160 minut a krytí 50 mm je pro výdrž 180 – 240 minut [30], [31].

### **4.4. Vlákna**

Ochranu betonových konstrukcí proti působení žáru a zabránění explozivního odprýskávání získáme díky použití vláken do betonu. Historie použití vláken začala již před 3500 lety, kdy se křehké sušené cihly vyztužovaly slámou. S postupem času se do malt začala používat koňská srst.

Vlákna se v betonu používají jako rozptýlená výztuž, která vykazuje nízkou pevnost v tahu. Při správné technologii výroby mají vlákna tendenci zlepšovat izotropně mechanické vlastnosti betonu při namáhání tahem i tlakem [32],[33].

#### 4.4.1. Ocelová vlákna

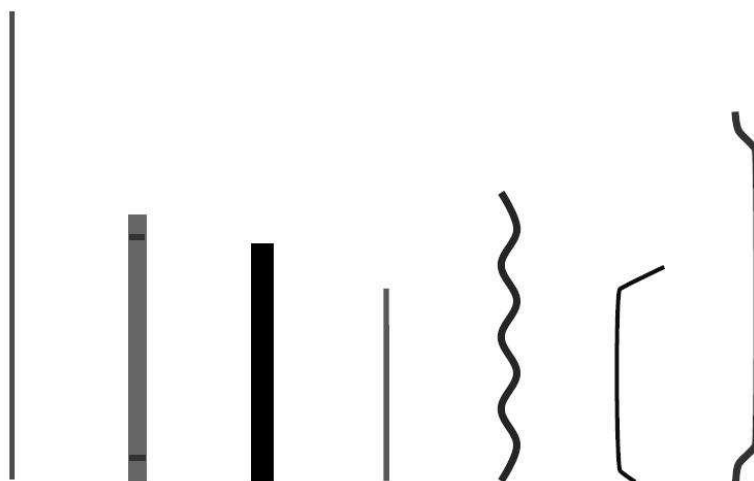


**Obrázek 4: Ocelová vlákna [34]**

Přidáním vláken do běžného betonu se zabráňuje vzniku mikrotrhlin, které mají za následek poškození matrice. Ocelové vlákna jsou rovnoměrně rozdělená v betonu pro zlepšení odolnosti vůči tahovému napětí. Ocelové vlákna jsou schopna změnit tradiční křehké žáruvzdorné materiály na robustní a těžké směsi. Rozsah provozních teplot je většinou vyšší během oxidační teploty vláken.

Použitím ocelových vláken se v betonu mnohonásobně zlepšuje lomová houževnatost, zvyšuje se pevnost ve smyku a pevnost v tahu za ohybu. Následně byla i prokázána zvýšená odolnost proti popraskání a odlupování betonu, rovněž proti nárazu a vibracím.

Po přidání ocelových vláken je odzkoušeno, že monolitické žáruvzdorné betony za provozních teplot okolo 1600 °C vydržely dvakrát až třikrát déle. V některých případech vydržely až dvacetkrát déle. Díky těmto kladným vlastnostem se snižují potřebné opravy, provozní náklady a zvyšuje se ekonomika provozu [35].



**Obrázek 5: Tvary ocelových drátů [40]**

Vyztužené žáruvzdorné materiály mohou být v nepravidelných a úzkých tloušťkách, ale jejich únosnost bude pořád stejná. Z toho plyne, že dochází k menší spotřebě materiálu.

Použitím ocelových vláken se vlastnosti betonu zlepšují a beton se pak vyznačuje vysokou odolností proti abrazi, teplotním šokům, nárazům a vibracím a jsou odolnější proti vzniku trhlin[41].

#### **4.4.2. Polypropylenová vlákna**



**Obrázek 6: Polypropylenová vlákna [36]**



Polypropylenová vlákna se nejčastěji používají do malt, omítek, potěru, betonů, tmelů, asfaltu a živichných směsí. Použití těchto vláken omezuje poruchy a vznik trhlin od sedání a plastického smršťování.

Při přidání polypropylenových vláken do betonu nebo malty způsobí radikální odstranění smršťovacích trhlin v celém jeho objemu a rovněž na povrchu betonu, dále odstranění vnitřních vlásečnicových trhlin, zvýšení odolnosti a rázové houževnatosti [33].

Polypropylenová vlákna jsou vyrobena ze speciální směsi polypropylenu a polyetylenu nazývané také jako polymerní ocel. Vlákna mohou nahrazovat svařované sítě a ocelová vlákna v betonových podlahách nebo deskách, kde umožňují redistribuci napětí, a tím plně využítí pevnosti desky při minimálních nákladech.

Polypropylenová vlákna se při vysokých teplotách vytaví, a tím v betonu vznikají volné prostory, kvůli kterým se redukuje tlak a nedojde k explozivnímu odprýskávání, který má za následek odpadávání jednotlivých částí krycích vrstev konstrukce, následné odhalení výztuže, která není kryta před účinkem požáru. Odhalení ocelové konstrukce při požáru má zásadní význam, protože ohřátí výztuže na vysokou teplotu začíná její postupná degradace, která vede ke ztrátě základních mechanických vlastností a pevnosti oceli. Současně probíhá i ztráta pevnosti betonu vlivem vysokých teplot, vznikají trhliny, praskliny a případný následný kolaps konstrukce [37].

U oceli je definovaná základní oblast teplot, která má významný vliv na její pevnost. Jedná se o teploty okolo 400 °C, což se definuje jako oblast beze změn pevnosti a charakteristiky oceli. U teplot od 450°C do 600 – 650 °C se zvyšuje duktilita a tažnost oceli a začíná se projevovat spouštějící efekty změn. Při teplotě 750 °C začíná probíhat rekrystalizace a významná redukce pevnosti.

Při sledování jevu u polypropylenových vláken se zjistilo, že na eliminaci plastického smršťování se dosahuje nejúčinněji použitím kratších vláken než použitím dvojnásobné dávky delších vláken [38].

#### 4.4.3. Čedičová vlákna



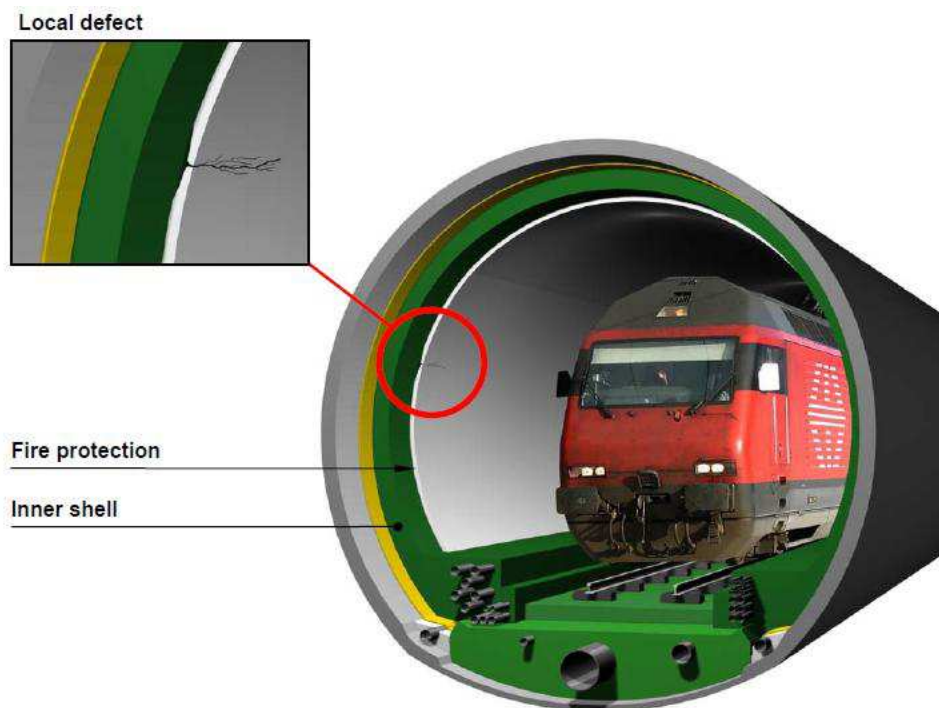
**Obrázek 7: Čedičová vlákna**

Tak jako ocelové a polypropylenové vlákno je i čedičové vlákno používané z důvodu zabránění drolení a explozivnímu odprýskávání betonu. Čedičové vlákno je oproti skelnému vláknu odolnější a odolává většímu rozptylu teplot. Výroba je podobná jako u skelného vlákna, kde ze svazku nekonečně dlouhých fibril (vznikly rozvlákněním taveniny čediče a bazaltu vhodného složení) vytéká čedičové vlákno a následuje nanášení lubrikace, která tvoří ochrannou funkci a zároveň jednotlivá vlákna spojuje. Čedičová vlákna jsou vysoce pevná, ohebná, zvyšují pevnost betonu a jsou zdravotně nezávadná.

Mezi hlavní charakteristické znaky patří velký tepelný rozsah použitelnosti, nehořlavost, nízká tepelná vodivost, vysoký koeficient zvukové pohltivosti a velmi dobrá chemická odolnost proti vodě, alkáliím, organickým a anorganickým kyselinám [49].

#### 4.5. FIRESHIELD

Fireshield je materiál, který se aplikuje stříkáním směsi ručně, anebo robotický na stávající vrstvu betonu v tunelech. Slouží jako proti požární ochrana a hlavní složka je založená na bázi schránek mikroorganismu. Po aplikaci FIRESHIELDU se stávající vrstva zahřeje na 1250 °C a FIRESHIELD plní funkci ochrannou[48].



Obrázek 8: Použití Fireshieldu

## 5. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část mé diplomové práce je zaměřená na návrh a ověření receptury čerstvého betonu s vyšší odolností proti vysokým teplotám, sledování vlivu působení teplot do 1300 °C, sledování změn fyzikálně mechanických vlastností a následné porovnání s referenčním betonem.

### 5.1. Laboratorní zkoušky

Na čerstvém betonu jsem v laboratoři měřila teplotu, kde teplota u první receptury byla 19,5 °C a u druhé receptury teplota byla 23 °C, dále jsem zjišťovala objemovou hmotnost a následně jsem zkoušela konzistenci a obsah vzduchu betonu.

#### 5.1.1. Zkouška sednutí (Abramsův kužel)

Princip zkoušky je zjistit konzistenci čerstvě namíchaného betonu. Zkoušku jsem provedla dle normy ČSN EN 12350-2 [44].

#### 5.1.2. Stanovení obsahu vzduchu

Obsah vzduchu se zkouší v tlakoměrné nádobě a postupovala jsem dle normy ČSN EN 12350-7 [45].

U ztvrdlého betonu jsem zjišťovala objemovou hmotnost a zkoušela pevnost v tlaku.

#### 5.1.3. Pevnost v tlaku

Zkoušku jsem prováděla dle ČSN EN 12 390-3[46].



Obrázek 9: Zkušební krychle zkoušená na pevnost v tlaku

## 5.2. Popis surovin vybraných receptur

### 5.2.1. Beton s vysokopecním cementem – receptura č. 1

- **CEM III/A 42,5 N:** Vysokopecní cement směsný, který obsahuje 36 – 65 % vysokopecní strusky a 35 – 64 % portlandského slínku, pevnostní třída cementu je 42,5 s počátečními pevnostmi
- **Kamenivo 0/4 Bílčice:** - drobné drcené kamenivo
- **Kamenivo 4/8 Bílčice:** - hrubé drcené kamenivo
- **Kamenivo 8/16 Bílčice:** - hrubé drcené kamenivo
- **Voda** - pitná voda
- **Čedičová vlákna:** - čedič je oproti sklu chemicky odolnější a odolává většímu rozptylu teplot, tvoří celkovou tuhost monolitu, zabraňují drobení betonu a zvyšují jeho odolnost proti alkáliím, chemickým látkám a zvyšují rovněž jeho pevnost. Pevnost v tahu se pohybuje kolem 1 000MPa a modul pružnosti 40GPa. Obvyklé dávkování do betonu je 1,5 kg/m<sup>3</sup>.



Obrázek 10: Čedičová vlákna

- **Polypropylenová vlákna:** - omezují vznik trhlin od napětí doprovázejících zrání a chrání před odprýskáváním betonu, obvyklé dávkování do betonu je 0,6 kg/m<sup>3</sup>. Dle ČSN EN 14889-2 jsou zařazená do třídy I<sub>a</sub> jako polymerní mikrovlákna monofilamentní. Vlákna jsou velmi jemná, v 1 kg je jich 450 miliónů kusů. Při požáru vlákna vytvářejí v betonu velmi hustou síť dutinek, do kterých se rozpínají plynné zplodiny. Betony, kde jsou použity polypropylenová vlákna, mají vyšší požární odolnost.



**Obrázek 11: Polypropylenová vlákna**

- **Plastifikátor:** - BASF Glenium SKY 980, superplastifikační přísada na bázi polykarboxyláteteru určená pro výrobu transporbetonu, doporučené dávkování je 0,2% až 3,0% hmotnosti cementu
- **Příměs:** - popílek Dětmárovice ČEZ

#### **5.2.2. Žáruvzdorný beton – receptura č. 2**

- **GÓRKAL 50+:** - chemické složení cementu obsahuje 51 – 55%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , obsah  $\text{CaO}$  je < 38% a obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  je < 3%, požární odolnost  $\geq 146$  sP a jeho hustota je  $3,0 \text{ g / cm}^3$
- **Kamenivo 0/4 Lupek typ D462 HR:** - pálený materiál, mezi jeho chemické a fyzikální vlastnosti patří obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je 35,0% a obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  je 3,0 %, žáruvzdornost je 169,0 sP a zdánlivá pórovitost je od 5 do 9 %. Teplota výpalu lupku D 462 HR je  $1,250 \text{ }^\circ\text{C}$  a výpal se provádí v rotační peci s předehříváčem.
- **Kamenivo 0/10 Lupek typ D462 HR:** - popis viz výše
- **Kamenivo 0/20 Lupek typ D462 HR:** - popis viz výše
- **Voda** – pitná voda
- **Mikrosilika:** - ElkemMicrosilica 968 je přísadou, která je vysoce reaktivní při slinování, což vede ke zlepšení keramického spojování za snížených teplot při spalování. Použití ElkemMicrosilicy968 je do malt, stříkacích směsí jiných tvarovaných a neformovaných materiálů. Obsah  $\text{SiO}_2$  je 96,5 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  je maximálně 0,3 % a obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je 0,7.
- **ADS:-** funkce výrobku ADS je ztekucení žárobetonu a konkrétně dispergace a zpomalení oxidu hlinitého. Chemické složení výrobku ADS je: obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je 80%,  $\text{Na}_2\text{O}$  je 0,10 %,  $\text{B}_2\text{O}_3$  je 0,80 % a obsah  $\text{CaO}$  je 1,80 %.



### 5.3. Návrh zkušebních receptur

U receptury č. 1 bylo namíchaných 9 zkušebních krychlí o hraně 150 mm, kde 8 krychlí se následně nechaly vypálit na stanovené teploty a jedna zkušební krychle byla použita jako referenční.

U receptury č. 2 bylo namícháno 12 zkušebních krychlí o hraně 100 mm, kde 9 krychlí bylo vypálených a poslední 3 krychle byly použité jako referenční.

**Tabulka 3: Navržená receptura č.1**

RECEPTURA Č.1		
název	množství	jednotka
CEM III/A 42,5 N	12,9	kg
0 - 4 Bílčice	45,603	kg
4 - 8 Bílčice	11,186	kg
8 - 16 Bílčice	29,353	kg
voda	7,08	kg
čedičová vlákna	1,5	kg
polypropylenová vlákna	0,6	kg
plastifikátor	0,1336	kg
příměs	3,87	kg

**Tabulka 4: Navržená receptura č.2**

RECEPTURA Č. 2		
název	množství	jednotka
ADS	0,024	kg
lupek 0-4	12	kg
lupek 0-10	18,5	kg
lupek 0-20	8,5	kg
cement GÓRKAL 50+	11	kg
mikrosilika	1,2	kg
voda 11%	5,65	kg

## 5.4. Výsledky měření

Část surovin pro recepturu žarobetonu byly dodány ze stavební společnosti TEPLOTECHNA Ostrava, a.s. a zkušební krychle byly vyrobeny v akreditované zkušební laboratoři BETOTECH, s. r. o. v Ostravě – Vítkovicích a následný výpal a zkouška pevnosti v tlaku proběhla na Vysoké škole báňské na stavební fakultě.

### 5.4.1. Zkoušky čerstvého betonu

Konečné hodnoty jsem přehledně zpracovala do tabulky č. 5

**Tabulka 5: Výsledné hodnoty zkoušek**

<b>Objemová hmotnost čerstvého betonu</b>		
receptura	hodnota	jednotka
č. 1	2561	kg/m <sup>3</sup>
č. 2	2243	kg/m <sup>3</sup>
<b>Zkouška konzistence sednutím</b>		
receptura	hodnota	jednotka
č. 1	140	mm
č. 2	90	mm
<b>Obsah vzduchu</b>		
receptura	hodnota	jednotka
č. 1	2,5	%
č. 2	3,1	%





Obrázek 12: Porovnání objemových hmotností čerstvého betonu

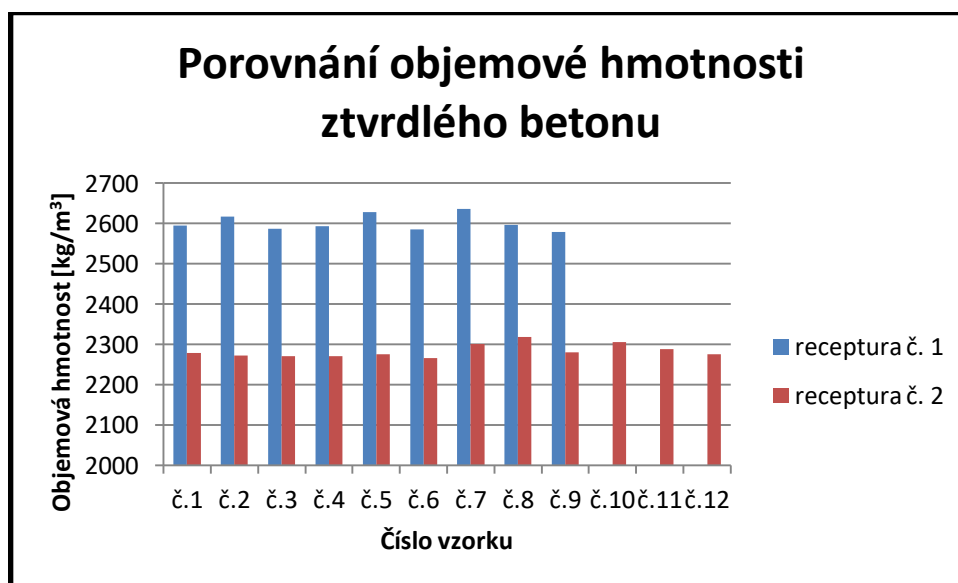
#### 5.4.1.1. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Tabulka 6: Objemová hmotnost receptury č. 1

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m <sup>3</sup> ]			
Krychle 150x150x150 mm			
receptura	číslo vzorků	OH <sub>ZB</sub>	Ø OH
č. 1	č.1	2595	Ø OH = 2602 kg/m <sup>3</sup>
	č.2	2617	
	č.3	2587	
	č.4	2594	
	č.5	2629	
	č.6	2585	
	č.7	2636	
	č.8	2597	
	č.9	2579	

Tabulka 7: Objemová hmotnost receptury č. 2

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m <sup>3</sup> ]			
Krychle 100x100x100 mm			
receptura	číslo vzorků	OH <sub>ZB</sub>	Ø OH
č. 2	č.1	2278	Ø OH = 2283 kg/m <sup>3</sup>
	č.2	2273	
	č.3	2271	
	č.4	2270	
	č.5	2275	
	č.6	2266	
	č.7	2301	
	č.8	2318	
	č.9	2280	
	č.10	2305	
	č.11	2288	
	č.12	2276	



Obrázek 13: Porovnání objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

#### 5.4.2. Zkoušky ztvrdlého betonu

U receptury č.1 jsem po namíchání zkušební krychle odbednila a nechala odpočinout při pokojové teplotě.

Dle normy ČSN EN ISO 1927-5 [47] jsem namíchanou recepturu č. 2 nechala v přikrytých formách po dobu 24 hodin zrát při teplotě 18 – 22 °C. Po odležení jsem zkušební krychle odbednila a dále na 24 hodin jsem je nechala uložené za stejných podmínek.

Následně jsem všechny zkušební krychle (receptura č. 1 i receptura č. 2) dala do sušárny po dobu min. 24 hodin při teplotě 110 °C. Velice důležité je, aby všechny strany zkušebních krychlí byly vystaveny teplému vzduchu.

Zkoušku pevnosti v tlaku jsem u nevypálených, tedy u referenčních krychlí, dělala až po vysušení a ochlazení.

Zkušební krychle, u kterých následoval výpal, musely být ochlazené na pokojovou teplotu a chráněné proti navlhnutí.

Z první receptury jsem si zkušební krychle rozdělila a vždy dvě dala do pece a postupně zatěžovala při teplotě 200 °C, 400 °C, 600 °C a 900 °C. Rychlost nárůstu teploty jsem volila podle tabulky č. 8z normy ČSN EN 1402-5 [48].

**Tabulka 8: Rychlost nárůstu teploty při výpalu**

<b>Teplota výpalu °C</b>	<b>Popis</b>	<b>Rychlost nárůstu teploty °C/minutu</b>
Do 1250 °C včetně	Od pokojové teploty až 50 °C pod vypalovací teplotu	5 až 10
	Posledních 50 °C	1 až 2
Nad 1250 °C	Od pokojové teploty až do 1250 °C	5 až 10
	Od 1200 °C do 50 °C pod teplotu výpalu	2 až 5
	Posledních 50 °C	1 až 2

U druhé receptury jsem měla 3 zkušební krychle o hraně 100 mm, které jsem vypalovala při teplotě 900°C, 1 100 °C a 1 200°C.

U výpalu je důležité, aby zkušební krychle ve vypalovací peci byly ukládané tak, aby se umožnila volná cirkulace horkých plynů. Vzorky musí být od sebe vzdálené nejméně 20 mm a alespoň 50 mm od stěny pece a nesmí se ukládat na sebe [48].

V zadání mé diplomové práce je výpal na teplotu 1 300 °C. Bohužel pec, kterou jsem měla k dispozici, dosahuje pouze maximálních teplot do 1 200 °C.

Doba výdrže musí být 5 hodin a udržuje se po uvedené dobu s přesností na  $\pm 10$  °C. Následně se vypalovací pec vypne a nechá se samovolně vychladnout. U výpalu při teplotě 800 °C se můžou dvířka pece otevřít, aby chlazení probíhalo rychleji [47].



**Obrázek 14: Vypalovací pec**



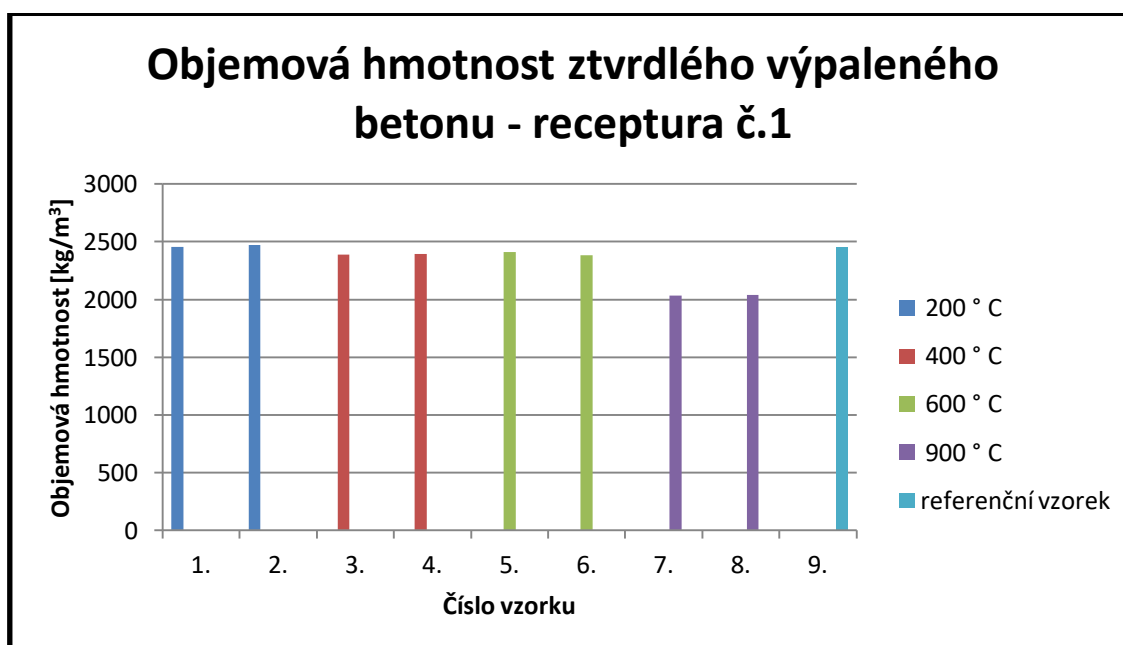
**Obrázek 15: Zkušební krychle před výpalem**

Po vyjmutí z pece a vychladnutí jsem zkušební krychle změřila, zvažila a vypočítala jsem jejich objemovou hmotnost. Následně jsem je dala do lisu a zkoušela jsem pevnost v tlaku.

#### 5.4.2.1. Objemové hmotnosti ztvrdlého vypáleného betonu

Tabulka 9: Objemová hmotnost receptury č. 1

Objemová hmotnost ztvrdlého vypáleného betonu [kg/m <sup>3</sup> ]					
receptura č. 1	200 ° C	400 ° C	600 ° C	900 ° C	referenční vzorek
1.	2455				
2.	2473				
3.		2390			
4.		2393			
5.			2411		
6.			2384		
7.				2031	
8.				2039	
9.					2450

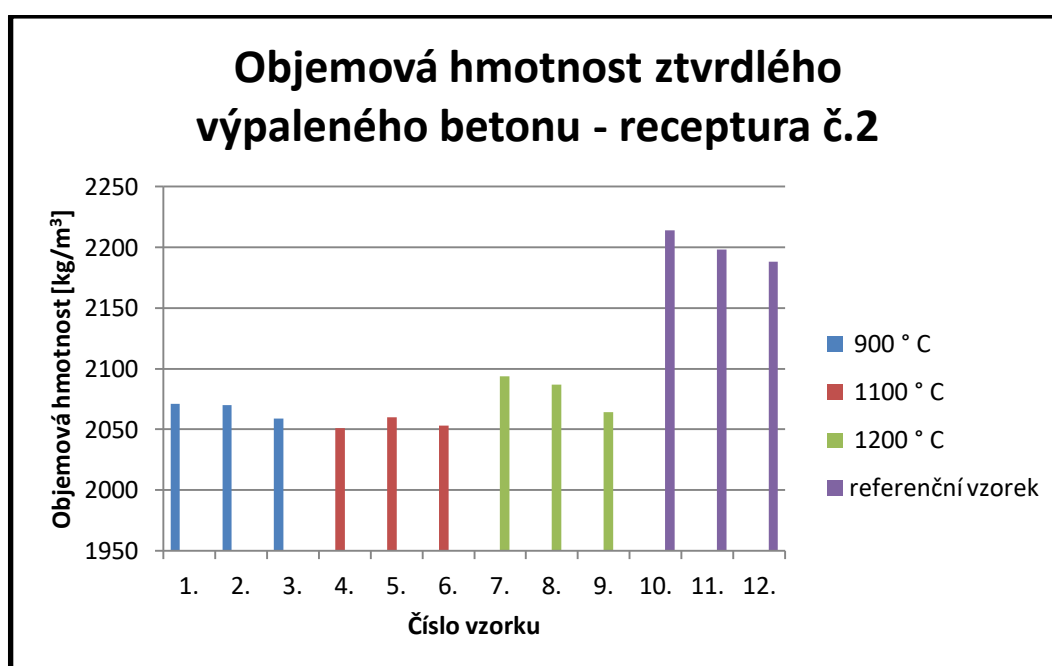


Obrázek 16: Graf objemové hmotnosti - receptura č. 1

Tabulka 10: Objemová hmotnost receptury č. 2

Objemová hmotnost ztvrdlého vypáleného betonu [kg/m <sup>3</sup> ]				
Krychle 100x100x100 mm				
receptura č. 2	900 ° C	1100 ° C	1200 ° C	referenční vzorek
1.	2071			
2.	2070			
3.	2059			
4.		2051		
5.		2060		
6.		2053		
7.			2094	
8.			2087	
9.			2064	
10.				2214
11.				2198
12.				2188

+



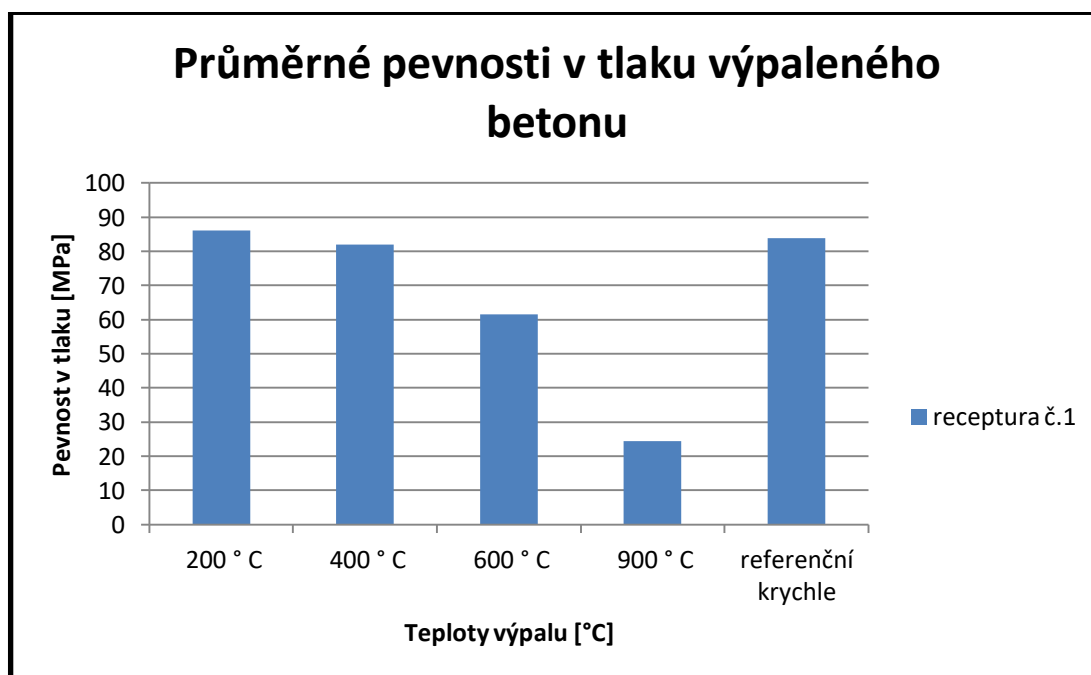
Obrázek 17: Graf objemové hmotnosti - receptura č. 2

Nejvyšší objemové hmotnosti dosáhla receptura č. 1, která při 200 °C nabyla průměrné hodnoty 2464 kg/m<sup>3</sup>. S postupným nárůstem teplotního zatěžování objemová hmotnost záměsi klesá. U čerstvého betonu dosáhla nejvyšší objemové hmotnosti rovněž receptura č. 1 s hodnotou 2561 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.4.2.2. Výsledné hodnoty pevnosti v tlaku

Tabulka 11: Pevnost v tlaku - receptura č. 1

Pevnost v tlaku [MPa]						
receptura	číslo vzorků	pevnost v tlaku	200 ° C	400 ° C	600 ° C	900 ° C
č. 1	č.1	88,98	Ø = 86,15 Mpa			
	č.2	83,31				
	č.3	84,76		Ø = 82,03 Mpa		
	č.4	79,3				
	č.5	61,93			Ø = 61,59 Mpa	
	č.6	61,24				
	č.7	24,05				Ø = 24,41 Mpa
	č.8	24,76				
		referenční	<b>89,3</b>			

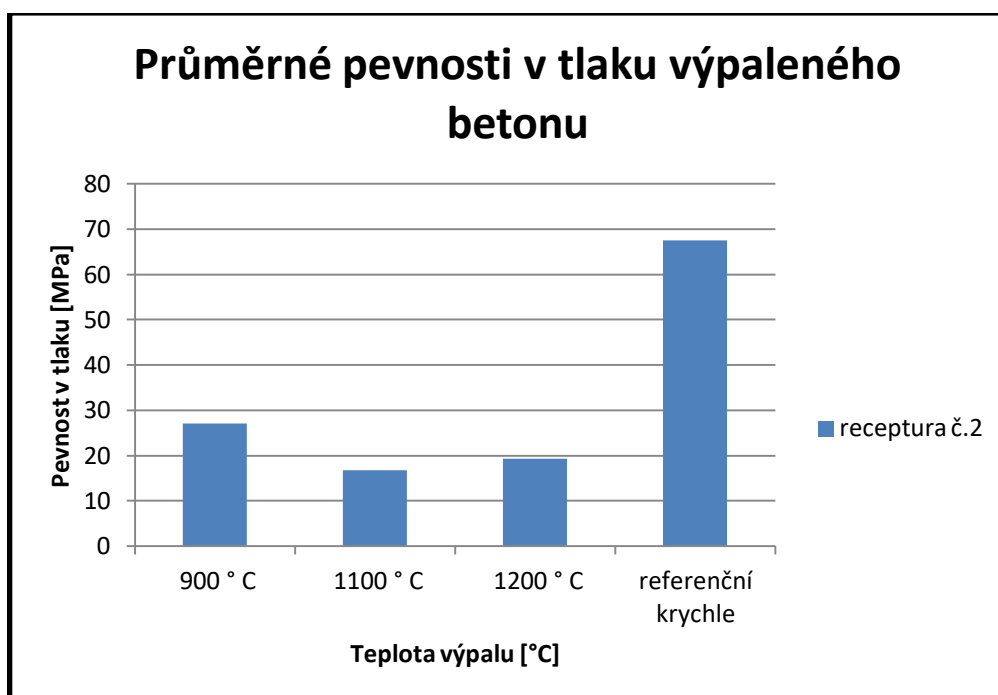


Obrázek 18: Průměrné pevnosti v tlaku - receptura č. 1

V porovnání s referenční krychlí měly největší pevnosti vzorky, které byly vystavené teplotě výpalu 200 ° C a jejich průměrná hodnota pevnosti je 86,15 MPa. Pevnost v tlaku referenční krychle je 89,3 MPa. S postupným nárůstem teplotního zatěžování klesají také pevnosti v tlaku.

Tabulka 12: Pevnost v tlaku - receptura č. 2

Krychle 100x100x100 mm					
Pevnost v tlaku [MPa]					
receptura	číslo vzorků	pevnost v tlaku	900 ° C	1100 ° C	1200 ° C
č. 2	č.1	26,78	Ø = 27,12 MPa		
	č.2	26,29			
	č.3	28,29			
	č.4	14,52		Ø = 16,77 MPa	
	č.5	15,32			
	č.6	20,46			
	č.7	19,05			Ø = 19,32 MPa
	č.8	20,07			
	č.9	18,85			
REFERENČNÍ KRYCHLE	č.10	67,62	Ø = 67,52 MPa		
	č.11	67,62			
	č.12	67,33			



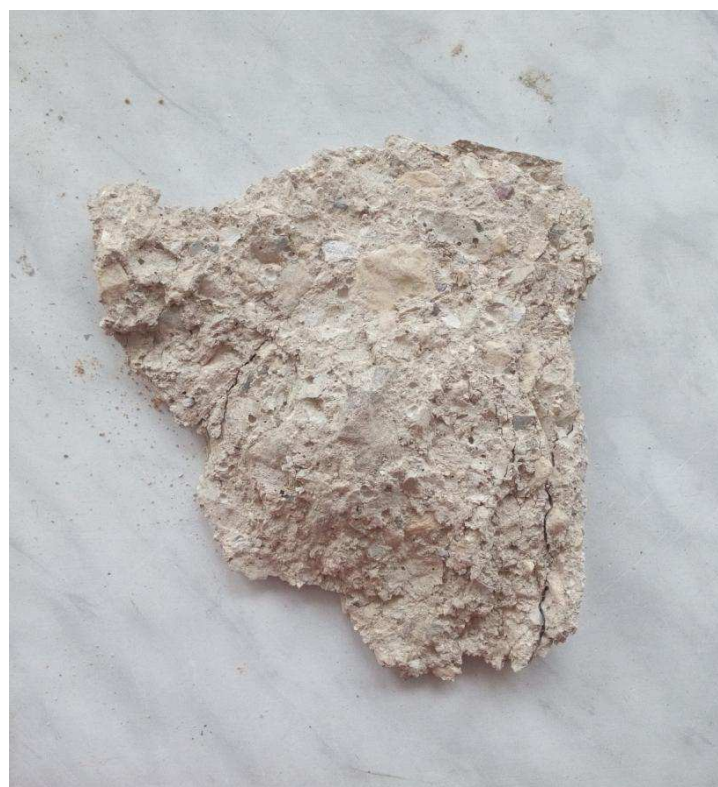
Obrázek 19: Průměrné pevnosti v tlaku - receptura č. 2

U žárobetonu jsou pevnosti 3x menší oproti pevnosti referenční krychle. Při teplotě 900 °C je průměrná pevnost žárobetonu 27,12MPa. S postupným nárůstem teplotního zatížení pevnost žárobetonu klesá, ale u teploty 1 200°C můžeme vidět zvětšení pevnosti na 19,3MPa.





**Obrázek 20: Detail části zkušební krychle, kde jsou viditelné čedičové vlákna-  
receptura č. 1**



**Obrázek 21: Detail zkušební krychle žárobetonu- receptura č. 2**



**Obrázek 22: Zkušební krychle po zkoušce pevnosti v tlaku - receptura č. 2**

## 5.5. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo připravit zkušební směsi a stanovit mechanicko – fyzikální vlastnosti betonu s odolností proti vysokým teplotám. Následně je porovnat a vyhodnotit. Pro tuto práci byly navrženy dvě betonové směsi. V první směsi byl použit vysokopecní cement CEM III/A 42,5N v kombinaci s čedičovými a polypropylenovými vlákny a druhá záměs byla namíchána z hlinitanového cementu GÓRKAL 50+ v kombinaci se žáruvzdorným lupkem typu D 462 HR.

V teoretické části byly popsány informace o betonech odolných proti vysokým teplotám. Jedná se o pojiva, plniva a různá vlákna. V další části jsou uvedeny normy, které se týkají žárobetonu.

V praktické části jsou vyjmenované zkoušky, které se prováděly na čerstvém a ztvrdlém betonu. Zkušební krychle byly vyrobeny v akreditované laboratoři BETOTECH v Ostravě – Vítkovicích. Následný výpal a zkoušky pevnosti v tlaku proběhly na Vysoké škole báňské na fakultě stavební. Výpal zkušebních krychlí a sledování fyzikálně mechanických vlastností betonu byly při teplotách 200 °C, 400 °C, 600°C, 900 °C, 1 100 °C a 1 200 °C.

V první navržené směsi byly přidány komponenty zajišťující zvýšení odolnosti vůči působení vysokých teplot, konkrétně čedičová a polypropylenová vlákna.

Z konečných výsledků vyplývá, že u první receptury je průměrná objemová hmotnost u všech teplot výpalu menší než u referenčního vzorku.

Co se týče pevnosti v tlaku, můžeme vidět, že při teplotě 200°C je pevnost v tlaku podobná jako u referenčního vzorku. S následným teplotním zatížením však pevnost klesá. Největší pevnostní rozdíl je při teplotě 600°C (61,59 MPa) na 900°C (24,41 MPa). Pevnost v tlaku při teplotě 900°C je 3x menší než u referenčního vzorku.

U této receptury doporučuji použití do teploty 600°C, kde jsou pevnosti v tlaku větší.

U druhé receptury, kde byl použitý cement GÓRKAL 50+ a žáruvzdorný lupek D 462 HR jsou průměrné objemové hmotnosti vypálených krychlí menší než u referenčního vzorku.

Co se týče pevnosti v tlaku vypálených krychlí na teplotu 900°C je pevnost 2x menší než u referenční krychle. S postupným teplotním zatížením pevnost rovněž klesá. Při teplotě 1200°C mají krychle průměrnou pevnost 19,32 MPa. Při použití druhé receptury nenastane rychlá a velká ztráta pevnosti, jelikož se konverze urychlila výpalem na vysoké teploty.

Zvýšení pevnosti v tlaku můžeme docílit použitím cementu s vyšším obsahem oxidu hlinitého GÓRKAL 80, použitím žáruvzdorné přísady GÓRFLOW a snížením vodního součinitele.

Obě receptury měly pozitivní účinek, kvůli tomu mohou být doporučeny k použití v objektech, kde může hrozit extrémní teplotní zatížení, jako jsou například silniční tunely. Vzhledem k rozsahu a možnostem není snadné se touto problematikou zabývat.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] STARONĚ, Jozef a František TOMŠŮ. Žiaruvzdorné materiály: výroba, vlastnosti a použitie. Košice: SLOVMAG, 2000.
- [2] NEVRIVOVÁ, L. Žárovzdorné materiály, Speciální keramika, Studijní opory VUT Brno, 2006.
- [3] CSN EN 1402-1. Žárovzdorné výrobky netvarové: Část 1: Úvodní ustanovení a klasifikace. Plzeň: Český normalizační institut, 2004.
- [4] TOMŠŮ, František a Štefan PALCO. Žárovzdorné materiály. Vyd. 1. Praha: CSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2009, 110 s. ISBN 978-80-02-02170-4.
- [5] JERSÁK, Vladislav. *Zkoumání mechanických vlastností žárobetonu s ohledem na jejich použití pro keramické kotevní prvky*. Brno, 2007. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [6] STARON, Jozef a František TOMŠŮ. Žiaruvzdorné materiály: Výroba, vlastnosti a použitie. Bratislava: Alfa, 1992, 399 s. ISBN 80-050-1023-0.
- [7] JAROSLAVA, Medvecová a Mužík PETR. Žárobetony na bázi kaolinových ostřiv. Brno, 2003. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2003texty/pdf/4-2/np/medvecova.pdf>
- [8] LACH, Vladimír. Keramika. 3. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992, 172 s. ISBN 80-214-0332-2.
- [9] 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
- [10] PROCHÁZKA, Jaroslav, et al. Navrhování betonových konstrukcí 1: Prvky z prostého a železového betonu. Třetí. Praha : MBA, 2007.
- [11] BRADÁČOVÁ, Isabela. Stavby z hlediska požární bezpečnosti. Vyd. 1. Brno: ERA group, 2007. 156 s. ISBN 978-80-7366-090-1.
- [12] <http://www.betontks.cz/downloads/Komplexni-pozarni-ochrana>

- [13] TZB-info: požární bezpečnost staveb [online]. 2017 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb>
- [14] VETCHÝ, Jan. Žárobeton: Beton odolný vysoké teplotě. BETON: Technologie, konstrukce, sanace. 2015, 3.
- [15] Zákon 183/2006 Sb. ze dne 14. března 2006, o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)
- [16] BRADÁČOVÁ, Isabela. Požární bezpečnost domu. Vyd. 2. Brno: ERA group, 2008. ISBN 978-80-7366-128-1.
- [17] KUPILÍK, V., Stavební konstrukce z požárního hlediska, 1. Vydání, Praha 2006, ISBN 80-247-1329-2
- [18] SIČÁKOVÁ, A. a kolektiv, New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications, 1. Vydání Košice, červen 2008, 156 str., ISBN 978-80-553-0040-5
- [19] ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [20] ČSN EN 1992-1-2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [21] ČSN 73 0863: Požárně technické vlastnosti hmot STANOVENÍ ŠÍŘENÍ PLAMENE PO POVRCHU STAVEBNÍCH HMOT. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1991.
- [22] ČSN EN 13501-1+A1 a 2: Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [23] ČSN EN 13823+A1 Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

- [24] ČSN EN ISO 1182: Zkoušení reakce výrobků na oheň – Zkouška nehořlavosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [25] ČSN EN ISO 11925-2: Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene - Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [26] ČSN EN ISO 1716: Zkoušení reakce výrobků na oheň – Stanovení spalného tepla. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [27] ISO 834-1:1999: Zkoušení požární odolnosti – Základy stavebnictví – Část 1: Všeobecné požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [28] Betoniek High Alumina Cement, Betoniek IX/1998
- [29] Górka cement [online]. Trzebinia [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.gorka.com.pl/>
- [30] NEVES, I.C., RODRIGUES, J.P.C Mechanical properties of reinforcing and prestressingsteels after heating, Journal of Materials in Civil Engineering, 8(4), 189-194, 1996
- [31] HERKA, Petr. Požární odolnost betonů – Praktické zkoušky a změny ve zkušebních tělesech. Stavební a investorské noviny [online]. Ostrovačice, 2010 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://tvstav.cz/clanek/374-pozarni-odolnosti-betonu-prakticke-zkousky-a-zmeny-ve-zkusebnich-telesech>
- [32] Polymerová vlákna do betonu. Www.ebeton.cz [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/polymerova-vlakna-do-betonu>
- [33] KODUR, V.K.R. Designing Concrete Structures for fire Safety, American Concrete Institute, 2008, ISBN: 978-0-87031-291-5
- [34] Tri Treg Třinec: Ocelová vlákna do betonu [online]. In: . [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.tritreg.cz/ocelova-vlakna-do-betonu/ocelova-vlakna-do-betonu/>
- [35] KrampeHarex [online]. Hamm [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.krampeharex.cz>

- [36] Stavebniny Ištok: Polypropylenová vlákna [online]. In: . [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://stavebniny-istok.sk/produkt-detail/polypropylenove-vlakna/>
- [37] NEVES, I.C.,RODRIGUES, J.P.C Mechanical properties of reinforcing and prestressingsteels after heating, Journal of Materials in Civil Engineering, 8(4), 189-194, 1996
- [38] BRIATKA, P.,ŠEVČÍK, P. Hodnotenie vplyvu rozptýlenej výstuže na vlastnosti betónu, Beton TKS, 2/2009
- [39] BECHYŇE, S. Betonové stavitelství, Technologie betonu a stavebních dílců, SNTL Praha, 1954.
- [40] Ebeton [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/>
- [41] TVIKON: Ocelová vlákna [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.tvikon.cz/produkty/prodej-ocelovych-vlaken-do-zarobetonu/>
- [42] BROŽOVSKÝ, Jiří. Zjištění přítomnosti hlinitanového cementu v betonu: Zpráva [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-11-25].
- [43] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Patrik BAYER a Lubomír VÍTEK. HLINITANOVÝ CEMENT JAKO POJIVO KONSTRUKČNÍHO BETONU. Beton: Technologie, konstrukce, sanace [online]. 2007, (3) [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2007-3-48\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2007-3-48_0.pdf)
- [44] ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [45] ČSN EN 12350-7: Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [46] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [47] ČSN EN ISO 1927-5: Žárovzdorné výrobky netvarové (monolitické) - Část 5: Příprava a zpracování zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [48] MEYCO® Fix Fireshield 1350 Assessment of passive fire protection from the standpoint of the engineer. Amberg Engineering, 2005.



[49] Basaltex: Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků [online]. Šumperk [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: [http://www.basaltex.cz/cedic/cedic\\_charakteristika\\_cz.htm](http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm)

## 7. Seznam obrázků

Obrázek 1: Druhy žárobetonu [1] .....	14
Obrázek 2: Teplotní účinnost typu vazby .....	18
Obrázek 3: Procesy a stabilita probíhající v průběhu zahřívání kameniva.....	27
Obrázek 4: Ocelová vlákna[34] .....	31
Obrázek 5: Tvary ocelových drátků[40].....	32
Obrázek 6: Polypropylenová vlákna [36].....	32
Obrázek 7: Čedičová vlákna .....	34
Obrázek 8: Použití Fireshieldu.....	35
Obrázek 9: Zkušební krychle zkoušená na pevnost v tlaku.....	36
Obrázek 10: Čedičová vlákna .....	37
Obrázek 11: Polypropylenová vlákna .....	38
Obrázek 12: Porovnání objemových hmotností čerstvého betonu.....	41
Obrázek 13: Porovnání objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.....	42
Obrázek 14: Vypalovací pec .....	44
Obrázek 15: Zkušební krychle před výpalem .....	44
Obrázek 16: Graf objemové hmotnosti - receptura č. 1 .....	45
Obrázek 17: Graf objemové hmotnosti - receptura č. 2 .....	46
Obrázek 18: Průměrné pevnosti v tlaku - receptura č. 1 .....	47
Obrázek 19: Průměrné pevnosti v tlaku - receptura č. 2 .....	48
Obrázek 20: Detail části zkušební krychle, kde jsou viditelné čedičové vlákna- receptura č. 1.....	49
Obrázek 21: Detail zkušební krychle žárobetonu- receptura č. 2 .....	49
Obrázek 22: Zkušební krychle po zkoušce pevnosti v tlaku - receptura č. 2 .....	50

## 8. Seznam tabulek

Tabulka 1: Teplotní rozsah působení jednotlivých druhů vazby .....	18
Tabulka 2: Změny, ke kterým dochází v betonu při zahřívání [14] .....	24
Tabulka 3: Navržená receptura č. 1 .....	39
Tabulka 4: Navržená receptura č. 2 .....	39
Tabulka 5: Výsledné hodnoty zkoušek .....	40
Tabulka 6: Objemová hmotnost receptury č. 1 .....	41
Tabulka 7: Objemová hmotnost receptury č. 2 .....	42
Tabulka 8: Rychlost nárůstu teploty při výpalu .....	43
Tabulka 9: Objemová hmotnost receptury č. 1 .....	45
Tabulka 10: Objemová hmotnost receptury č. 2 .....	46
Tabulka 11: Pevnost v tlaku - receptura č. 1 .....	47
Tabulka 12: Pevnost v tlaku - receptura č. 2 .....	48

## **9. Přílohy**

Technický list CEM III/A 42,5N

Technický list GÓRKAL 50+

Technický list ADS