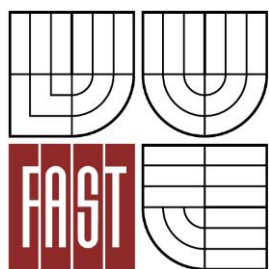


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A  
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

# MOŽNOST SUBSTITUCE PLNIVA A POJIVA POŽÁRNĚ ODOLNÝCH SPRÁVKOVÝCH MALT ALTERNATIVNÍMI SUROVINAMI

## SUBSTITUTION OF BINDER AND FILLER OF FIRE-RESISTANT REPAIR MORTARS USING ALTERNATIVE RAW MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Kamila Graclová

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Kamila Graclová
<b>Název</b>	Možnosti substituce pojiva a plniva požárně odolných správkových malt alternativními surovinami
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2013
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## Podklady a literatura

- Bodnárová, L. Kompozitní materiály ve stavebnictví. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 122 s.
- Svoboda L. a kol. Stavební hmoty. Jaga Bratislava, 2004. 471 s. ISBN 80-8076-007-1.
- Hela, R. Technologie betonu, Modul M01. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2005.
- Concrete Society: Polymers in concrete, The Constructoin Press, 1975.
- Emmons, P., H., Drochytka, R., Jeřábek, Z. Sanace a údržba betonu v ilustracích. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999, 334 stran, ISBN 0-87629-286-4.
- ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení, 2009.
- ČSN 73 0821 Požární bezpečnost staveb – Požární odolnost stavebních konstrukcí, 2007.
- ČSN EN 13501-1+A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň, 2010.
- ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky, 2000.
- www.mc-bauchemie.cz, www.sika.cz, www.promat-ap.com, www.sciencedirect.com

## Zásady pro vypracování

Problematika ochrany a opravy železobetonových konstrukcí zasažených požárem je s ohledem na dominantní pozici železobetonu jako stavebního materiálu velmi aktuální. Cílem práce je posoudit možnost částečné či úplné substituce plniva a pojiva v polymer-cementových kompozitních materiálech určených pro opravu železobetonových konstrukcí s vyšší odolností proti požáru. V rámci vypracování bakalářské práce jsou požadovány následující výstupy:

1. Souhrn informací týkajících se principu uplatnění polymer-cementových kompozitů v železobetonových konstrukcích s vyšší požární odolností s důrazem na kritickou situaci – při působení požáru.
2. Studium odborných článků zaměřených na výzkum v oblasti správkových hmot s vyšší odolností vůči extrémním teplotám – složení, parametry, princip mechanismu působení.
3. Zmapování především tuzemské situace z hlediska potenciálně vhodných alternativních nejen druhotných surovin s ohledem na možnost parciální či úplné substituce plniva a/nebo pojiva v zamýšlených kompozitních materiálech.
4. Vyhodnocení získaných poznatků a informací již probíhajícího výzkumu, aktuálně dostupných alternativních surovin s úvahami a doporučeními pro případný navazující výzkum, tj. výběr surovin, návrh receptur, zvážení substituce složení polymer-cementových kompozitů s odolností vůči extrémním teplotám při působení požáru atd.

## Předepsané přílohy

.....  
doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Problematika ochrany a opravy železobetonových konstrukcí zasažených požárem je s ohledem na dominantní pozici železobetonu jako stavebního materiálu velmi aktuální. Cílem práce je posoudit možnost částečné či úplné substituce plniva a pojiva v polymercementových kompozitních materiálech alternativními surovinami v případě těchto materiálů pro opravu železobetonových konstrukcí s vyšší odolností proti požáru.

## **Klíčové slova**

Požárně odolné správkové malty, polymercementové kompozity, polymercementové malty, vysokopevnostní správkové malty, odolnost proti požáru.

## **Abstract**

The issue of protection and repair of reinforced concrete constructions affected by fire is very timely with respect to the dominant position of reinforced concrete as a building material. The aim is assessment of possibilities partial or complete substitution of the filler and the binder polymer composite materials intended for the repair of reinforced concrete constructions with higher resistance to fire.

## **Key words**

Fire resistant repair mortar, polymer composites, polymer mortar, high strength repair mortar, fire resistance.

**Bibliografická citace VŠKP:**

GRATCLOVÁ Kamila, Možnost substituce plniva a pojiva požárně odolných správkových malt alternativními surovinami, Bakalářská práce, Brno 2014, s. 70. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne:

.....  
Kamila Graclová

**Poděkování:**

Tímto bych ráda poděkovala doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc. jako vedoucímu mé bakalářské práce, a také Ing. Tomáši Melicharovi, Ph.D. jako konzultantovi mé bakalářské práce za jejich odborné vedení, za cenné připomínky a rady při vypracování této práce.

## Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2. CÍL .....</b>	<b>11</b>
<b>3. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Chování železobetonu při extrémních teplotách .....</b>	<b>12</b>
3.1.1. Změny probíhající v betonu v závislosti na teplotě .....	12
3.1.1.1. Změny struktury betonu .....	13
3.1.1.2. Vliv složení na vlastnosti betonu při vysokých teplotách .....	16
3.1.2. Chování betonářské oceli při extrémních teplotách .....	23
3.1.3. Změny v železobetonu vlivem extrémních teplot .....	25
3.1.3.1. Odštěpování betonu .....	26
3.1.3.2. Průběh porušení železobetonového prvku exponovaného požáru .....	28
3.1.4. Shrnutí získaných poznatků .....	29
<b>3.2. Správkové hmoty .....</b>	<b>30</b>
3.2.1. Vlastnosti správkových hmot .....	30
3.2.2. Polymercementové malty a betony – složení a jeho vliv na vlastnosti PCC .....	32
<b>3.3. Polymercementové malty pro extrémní teploty .....</b>	<b>34</b>
3.3.1. Zahraniční výzkum v oblasti požárně odolných hmot .....	34
3.3.2. Modifikace pojiva .....	34
3.3.2.1. Polymercementová malta na bázi vysokopecní strusky, porcelánu a polypropylenových vláken .....	34
3.3.2.2. Malty s vysokým obsahem popílku a nanočásticemi oxidu křemičitého .....	35
3.3.2.3. Vysokopevnostní malta na bázi nanočástic oxidu hlinitého .....	36
3.3.2.4. Vysokopevnostní malta na bázi nanočástic titanu .....	38
3.3.3. Modifikace plniva .....	38
3.3.3.1. Polymercementová malta na bázi lehkého kameniva .....	38
3.3.3.2. Požárně odolná malta na bázi strusky a pemzy .....	39
3.3.4. Shrnutí získaných poznatků .....	40
<b>3.4. Potenciálně vhodné alternativní suroviny .....</b>	<b>41</b>
3.4.1. Modifikace pojiva .....	41
3.4.1.1. Popílek .....	42
3.4.1.2. Struska .....	44
3.4.2. Modifikace plniva .....	46
3.4.2.1. Škvára .....	46
3.4.2.2. Umělé kamenivo .....	46
<b>3.5. Diskuze poznatků a zjištění z teoretické části .....</b>	<b>47</b>



<b>4. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1. Metodika .....</b>	<b>49</b>
4.1.1. Návrh receptur, příprava těles a expozice malt vysokým teplotám .....	49
4.1.2. Fyzikálně-mechanické zkoušky .....	50
4.1.3. Mikrostrukturní analýzy .....	51
<b>4.2. Výsledky zkoušek a analýz .....</b>	<b>51</b>
4.2.1. Fyzikálně-mechanické parametry .....	52
4.2.2. Mikrostruktura .....	53
<b>4.3. Diskuze poznatků a zjištění z praktické části .....</b>	<b>62</b>
<b>5. ZÁVĚR .....</b>	<b>64</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>65</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>70</b>

# 1. ÚVOD

Správkové hmoty pro sanace železobetonových konstrukcí zaujímají v oblasti stavebních materiálů nezastupitelnou pozici. Souvislost je patrná především při opravách tunelů, mostů, chladících věží, jímek odpadních vod, obytných staveb atd. Pro své vlastnosti jsou nejvíce používány malty na bázi polymer-cementové matrice a anorganického plniva. Jednou z alternativ aplikace těchto hmot je také využití při sanaci konstrukcí, kde lze předpokládat zvýšené riziko vzniku požáru. Zde je nasnadě využití hmot, které jsou odolné až do teplot v rozmezí 1000 °C až 1400 °C.

Přibližně 60 % až 80 % objemu správkové hmoty tvoří kamenivo a je tedy v tomto materiálovém systému nejvíce zastoupenou složkou. Zbylou část objemu zaujímá pojivová matrice, přísady, příměsi a rozptýlená výztuž. Pro dosažení dostatečné odolnosti kompozitního materiálového systému vysokým teplotám je nejprve třeba věnovat pozornost všem složkám jednotlivě a dále pak i jejich spolupůsobení. V případě kameniva je podstatný jeho mineralogický původ. Důvodem je jednak objemová nestabilita vlivem modifikačních přeměn a dále pak rozklad (např. vápenec). Teplotní odolnost cementové matrice obsahující běžný portlandský cement je značně omezena. Proto jsou z hlediska zvyšování tepelné odolnosti využívány cementy směsné, různé modifikační složky, příp. lze uvažovat o matici na zcela jiné materiálové bázi. Pro dosažení vyšší odolnosti vůči extrémním teplotám je využívána také rozptýlená polymerní výztuž. Této ovšem v práci nebude s ohledem na zadání věnována přílišná pozornost.

Na základě průzkumu bylo zjištěno, že tuzemský trh nedisponuje dostatečným množstvím výrobků – správkových malt odolných vůči vysokým teplotám. Dále také s ohledem na situaci týkající se životního prostředí se nabízí možnost zužitkování co nejvyššího množství různých alternativních surovin (druhotné suroviny, vedlejší produkty různých průmyslových výrob atd.), které by v případě jejich nevyužití představovaly odpad. Substituce plniva a pojiva správkových malt odolných vůči vysokým teplotám může mít tedy zásadní dopad v příznivém slova smyslu jednak na aktuální, ovšem i budoucí environmentální situaci a rovněž i na zvýšení konkurenceschopnosti výrobků modifikovaného složení (zlepšení jejich materiálových vlastností, snížení ceny atp.).

## 2.CÍL

Záměrem práce je posouzení možnosti náhrady plniva a pojiva v polymer-cementových kompozitních materiálech pro sanaci železobetonových konstrukcí. Cílovou skupinou jsou malty s vyšší odolností vůči působení extrémních teplot. Z hlediska dosažení cílů bude věnována pozornost studiu a rešerší relevantních zahraničních publikací. V první řadě bude kladen důraz na železobetonové konstrukce a jejich požární odolnost. Podstatným bude objasnění a pochopení principu degradace cementových, resp. polymer-cementových kompozitů při jejich expozici v prostředí o vysokých teplotách, tj. disociační procesy, objemové změny, poruchy v rozhraní jednotlivých složek atd. Dále bude věnována pozornost souhrnu poznatků z výzkumu zabývajícího se vývojem tepelně odolných malt a detailním analyzováním jejich parametrů i z hlediska mikrostruktury. V rámci dosažení cílů bude také třeba zmapovat tuzemskou situaci vybraných potenciálně vhodných alternativních surovin – modifikačních složek uvažovaných malt. Všechna učiněná zjištění a získané poznatky budou vyhodnoceny a u vybraných surovin pak bude formou experimentálního ověření zhodnocen jejich vliv na zvýšení odolnosti polymer-cementové matrice vůči vysokým teplotám.

## 3. TEORETICKÁ ČÁST

### 3.1. Chování železobetonu při extrémních teplotách

Železobeton vystavený extrémním teplotám je těmito teplotami velmi ovlivňován. Extrémní teploty mohou mít za následek nerovnoměrné objemové změny betonu, které jsou příčinou následného narušení soudržnosti betonu, které je doprovázeno odlupováním povrchových vrstev betonu, až do dosažení obnažení výztuže betonu, kdy dojde k dilataci výztuže a její soudržnost s betonem se výrazně sníží. Během tohoto procesu dochází v materiálu k rozkladným procesům matrice a kameniva, modifikačním změnám, ke změnám v chování kameniva, oceli a výrazně se mění parametry betonu. Je proto potřeba objasnit změny vlastností jednotlivých složek železobetonu.[1]

#### 3.1.1. Změny probíhající v betonu v závislosti na teplotě

Beton je kompozitní materiál se základem tvořeným pojivem a kamenivem. Jeho pevnost v tlaku je velmi dobrá, avšak řádově menší je jeho pevnost tahová, proto se v místech kde na beton působí tahové napětí, vkládá betonářská výztuž. V případě zvyšování pouze houževnatosti může být také použita rozptýlená výztuž. Beton je klasifikován jako nehořlavý materiál, avšak je-li vystaven účinkům vysokých teplot, jeho pevnost se zmenšuje a spolu s ní i pevnost betonářské výztuže. Celkově je narušena soudržnost a celistvost betonu a výztuže.

Změny vznikající v betonu jsou změny chemické i změny fyzikální. Velikost těchto změn je dána *vnitřními* a *vnějšími* faktory. Vnitřní faktory jsou kvalitativní vlastnosti betonu, vnější faktory jsou průběhy teplot v betonu, délka tepelné zátěže na beton, namáhání na konstrukci a způsob přestupu tepla v betonu. [2]

Z pohledu pevnosti v tlaku, je pro nás velmi důležité aby beton dosahoval vysokých tzv. zbytkových pevností v tlaku po vystavení požáru, a to právě z důvodu zachování stability celé konstrukce. Tato zbytková pevnost v tlaku betonu je ovlivněna nejen teplotou, jíž je beton vystaven, ale také rychlosti ochlazování materiálu. V Tab. 1 jsou uvedeny zbytkové pevnosti betonových vzorků vystavených postupně narůstajícím extrémním teplotám v závislosti na rychlosti ochlazení betonu. Vzorky, na nichž byly tyto zkoušky provedeny, byly z betonu vytvořeného z portlandského

cementu, písku a drceného hrubého čedičového kameniva, vodní součinitel byl  $w = 0,5$ . [20]

**Tab. 1 – Zbytkové pevnosti v tlaku v betonu v závislosti na teplotě [20]**

Způsob ochlazování	Pevnosti v tlaku [MPa]					
	22 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
Pomalé ochlazování	44,9 (100 %)	43,0 (96 %)	36,0 (80 %)	28,9 (64 %)	10,4 (23 %)	0 (0 %)
Rychlé ochlazování	-	37,9 (84 %)	28,4 (63 %)	21,1 (47 %)	8,0 (18 %)	0 (0 %)

Z Tab. 1 je zřejmé, že zbytková pevnost v tlaku betonu se výrazně snižuje v závislosti na zvyšování teploty, k tomuto poklesu zároveň výrazně přispívá rychlé ochlazování prvku. Tento pokles má za následek vznik mikrotrhlin a makrotrhlin ve struktuře betonu [6]. Prvek s počáteční pevností v tlaku 44,9 MPa při pokojové teplotě 22 °C není při vystavení teplotě 200 °C zásadně ohrožen, zbytková pevnost klesla jen o 4 %. Největší ztráty pevností jsou v okamžiku dosažení teploty 800 °C, kde se zbytková pevnost v tlaku betonu sníží o více než 50 %. Naprostá ztráta pevností je v okamžiku dosažení teploty 1000 °C a to z důvodu rozkladu CSH fází kdy se betonový prvek rozpadá.

Různé chladicí režimy ovlivňují rozdílnost zbytkových pevností, kdy může dojít k dalšímu poklesu zbytkových pevností, v porovnání s pozvolným chlazením, až o 20 – 30 % [19], [28]. V případě rychlého chlazení dochází k větším ztrátám pevností, to proto, že při rychlém chlazení vodou vzniká hustší struktura pórů v betonu, než při pomalém chlazení. Tato skutečnost přispívá k mohutnější rehydrataci složek v betonu, čímž vzniká více pórovitá struktura a dřívějšímu snižování pevností a následně rozpadu betonu.[20]

V případě ztráty pevnosti betonu během požáru se jedná o děj nevratný, proto po odeznění tepelných působení pevnost již nenabude původních hodnot.[2]

### 3.1.1.1. Změny struktury betonu

Je-li struktura betonu narušena, je potřeba provést posouzení na rozsah poškození vysokými teplotami. Prvotní posouzení se často provádí na základě vizuálních barevných změn na povrchu betonu, dále vytvořených trhlin či odprýskaného povrchu betonu. Právě dle zbarvení betonu nebo rozsahu poškození a porušení lze orientačně odhadnout maximální dosaženou teplotu během požáru (viz Tab. 2). [2], [8]

**Tab. 2 – Přehled změn k nimž dochází v průběhu zahřívání betonu [2][8]**

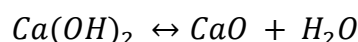
		Teplota	Vnitřní změny	Vnější změny
zbarvení	normální	20 – 80 °C	- pomalá ztráta kapilární vody a snižování soudržnosti v důsledku expanze vlhkosti	beze změn
		100 °C	- zřetelné (až stonásobné) zvýšení propustnosti vody - počátek hydratace CSH gelu - 80 – 150 °C dehydratace ettringitu - 150 – 170 °C rozklad sádry $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - 171 °C tavení polypropylenových vláken	výskyt trhlin
		200 °C	- ztráta fyzikálně vázané vody - zvýšení vnitřního tlaku	
	růžové	300 °C	- praskání křemičitého kameniva – 350 °C - kritická teplota pro vodu – 374 °C, poté už není možná přítomnost vody volné - ztráta pevnosti v tlaku – rozsah 15 – 40 % dle skladby betonu	explosivní odprýskávání
		400 °C	- tepelný rozklad portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	
		500 °C	- změna krystalové fáze z $\beta$ na $\alpha$ – 573 °C v kamenivu i písku - ztráta pevnosti v tlaku – rozsah 55 – 70 % dle skladby betonu	
		600 °C	- druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta - \text{C}_2\text{S}$	
		700 °C	- tepelný rozklad uhličitánu vápenatého $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ - silná endotermická reakce doprovázena uvolňováním oxidu uhličitého	
		800 °C	- vznik keramických vazeb nahrazujících hydraulické vazby	
	žlutohnědé	1100 – 1200 °C	- tvorba wollastonitu $\beta$ ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )	
1300 °C		- celkový rozpad betonu - tavení některých složek		

Dosáhne-li teplota hodnoty 100 °C, začne se odpařovat fyzikálně vázaná voda spolu s vlhkostí obsaženou v pórech betonu, volná voda je zcela odstraněna při 120 °C. Nad teplotou 150 °C dochází ke ztrátě vody chemicky vázané v křemičitanu vápenatém, tato ztráta vody probíhá až do teplot 270 °C. Tento proces prozatímne zvyšuje pevnost betonu, přičemž rychlost odpařování vody je různá dle druhu betonu (např. vysokopevnostní, obyčejný či lehký) a také dle technologie výroby betonu. Je-li struktura betonu více pórovitá, pak jsou kladeny menší zábrany unikající vodě,

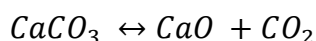
tzn., že vnitřní napětí nebude mít takový rychlý nárůst. Ztráta vlhkosti je vratný děj, kdy během ochlazování se z okolí začne opět vázat voda do struktury betonu.

Teploty nad 300 °C způsobují mikrotrhliny na povrchu betonu, jenž je teplotě vystaven. A jelikož v tomto případě dochází k prudké expanzi páry, může dojít k odprýsknutí horní vrstvy betonu – tzv. explozivní odprýskávání. [2]

V intervalu 400 – 600 °C se uvolňuje ze struktury betonu chemicky vázaná voda, kdy dochází k rozkladu hydroxidu vápenatého (portlanditu), dle rovnice:



Touto reakcí se výrazně mění pevnost i ostatní fyzikální parametry betonu. K další důležité změně dojde při dosažení teploty 700 °C v cementovém pojivu a kamenivu obsahující kalcit. V tomto případě dochází k tepelnému rozkladu vápence, dle rovnice: [2]



kdy vápenec se může rozložit v podobě tří modifikačních přeměn, a to v podobě stabilního hrubozrnného kalcitu, který se rozkládá později nežli méně stabilní jemnozrnné modifikace aragonitu – vznikající za vyšších teplot, a vzácné modifikace vateritu – vznikající za atmosférického tlaku a normální teploty. Obě tyto méně stabilní modifikace zvyšováním teploty přechází na stabilní kalcit. Uvádí se, že přeměny těchto modifikací probíhají v rozmezí teplot 550 – 580 °C, nejpozději 700 °C v závislosti na množství modifikací ve struktuře směsi. [7]

Při této reakci nastává problém se vzniklým volným CaO, který při přímém styku s vodou, např. v situaci hašení požáru, začne hydratovat na Ca(OH)<sub>2</sub>. Hydratací zvětšuje svůj objem, proudí póry v betonu a následně začne způsobovat trhliny ve struktuře působením krystalizačního tlaku, což může vést k rozpadu betonu. Dále se rozkládají CSH fáze a při teplotě 600 °C lze vypořádat drolení betonu. [20]

Přesáhne-li teplota 800 °C, dochází k úplnému uvolnění chemicky vázané vody a k poklesu pevnosti betonu, struktura betonu se začne rozpadat a v cementovém tmelu dochází ke vzniku keramických vazeb. Protože hydraulické vazby v betonech jsou stabilní pouze při nižších teplotách, od teploty 900 °C jsou nahrazovány vazbami keramickými, které způsobují nárůst mechanických pevností betonu až do teplot

cca 1150 °C<sup>1</sup>, v praxi se tento efekt nazývá jako slinutí betonu. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při kterém vzniká oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) – plynná látka rozrušující beton. Při těchto teplotách se začnou odlupovat kusy betonu. U běžných betonů dochází k jejich tání až při teplotách 1200 °C, ale např. u žárovzdorných betonů k tomuto jevu dochází až při 1550 °C. Výsledné změny v mikrostruktuře mají za následek zhoršení pevnostních vlastností a trvanlivosti betonu. [2], [5].

### **3.1.1.2. Vliv složení na vlastnosti betonu při vysokých teplotách**

Složení betonu a obecně cementových kompozitů je jedním z klíčových faktorů podílejících se na odolnosti těchto materiálů vůči šokovému působení extrémních teplot. Podle ČSN EN 1992-1-1 pro zvýšené teploty (dlouhodobě do 250 °C) lze použít obyčejný hutný beton vhodného složení, tedy s portlandským nebo struskoportlandským cementem a vhodným kamenivem, pro vyšší teploty lze použít žárobeton. U žárobetonů je teplota, pro kterou jsou určeny vždy stonásobkem jejich označení teplotní třídy. ČSN EN 1992-1-1 stanovuje třídy Ž3, Ž6 – Ž13 (např. pro Ž8 je teplota užití žárobetonu 800 °C). [3]

Změny mechanických vlastností betonu nastávají při teplotě vyšší než 300 °C. Důsledkem vysokých teplot dochází ke ztrátě pevnosti, modulu pružnosti a zvýšení deformace a dotvarování změnou fyzikálně – chemického složení cementového tmele. Nicméně tyto poklesy jsou rozdílné z hlediska konkrétních použitých složek. Mechanické parametry betonu tedy ovlivňuje druh pojiva, kameniva, přísad, vzájemný poměr těchto komponent a skladovací podmínky.

Portlandit Ca(OH)<sub>2</sub> je jednou z hlavních fází vytvořených v matrici betonu. Tvorba hydroxidu vápenatého má významný vliv na mechanické vlastnosti betonu, zejména v přítomnosti reaktivních – pucolánových, příp. latentně hydraulických – materiálů, jako je metakaolin, vysokopecní struska, mikrosilika, popílek atd. Použití pucolánových materiálů zlepšuje mnoho parametrů cementových kompozitů (např. zpracovatelnost, pevnosti, odolnost vůči chemicky agresivním látkám, vodonepropustnost, mrazuvzdornost) na základě kombinace s vápnem za vzniku křemičitých nebo křemičitohlinitých hydrátů. Důležité jsou reakce amorfních křemičitých oxidů s pucolány, které urychlují počáteční fáze hydratace,

---

<sup>1</sup> Toto je ovšem v rozporu s poznatky a zjištěními, které uvádí Kubilay Akcaozog˘lu v [6] (viz. strana 10).



neboť pucolány mají schopnost absorbovat ionty  $\text{Ca}^{2+}$  – čímž se zvyšuje rychlost rozpouštění  $\text{C}_3\text{S}$ . [31]

Řada výzkumů ukázala, že přídavek některých minerálních přísad zlepšuje a zvyšuje odolnost betonu vůči požáru:

## **POJIVO:**

### **Pucolány:**

#### ▪ **Popílek**

Betonové vzorky prokazovaly lepší vlastnosti až do teploty 650 °C než u betonů s klasickou recepturou. Dokonce 10% náhrada cementu popílkem v cementovém tmelu dokáže eliminovat vznik trhlin při vystavení teplotě 600 °C. Dávkování popílku má také pozitivní vliv na zbytkovou pevnost cementového tmele, dokonce snižuje výskyt trhlin při vystavení vysokým teplotám. Obsahuje-li cement 20 – 30 % popílku, dochází ke zlepšení požární odolnosti a rozměrové stálosti při vystavení vysokým teplotám a pak vysokým vlhkostem nebo smáčení, avšak jen do teploty 600 °C. [22] Cementy obsahující popílek zabraňují či zpomalují korozi výztuže v betonu. Životnost betonu obsahující popílek je značně prodloužena. [29]

### **Latentně hydraulické složky:**

#### ▪ **Struska**

Použití strusky pozitivně ovlivňuje pevnosti betonu, snižuje poréznost materiálu a také snižuje následné smršťování betonu. Snížením smršťování je snížen také výskyt mikrotrhlin v matrici betonu. [9] Obsah strusky v betonu také zvyšuje odolnost vůči korozi výztuže, také životnost betonového prvku je značně prodloužena. Obsah strusky nahrazující cement zvyšuje odolnost vůči vysokým teplotám ve srovnání s ostatními stavebními materiály. Beton s obsahem strusky nevykazuje při vysokých teplotách významné škody a neuvolňuje toxické plyny nebo kouř po určitou dobu [32],[33]. Nicméně, tato odolnost je platná po omezenou dobu a za určitých teplot. Jsou-li překročeny mezní hodnoty, dochází k praskání a drolení za současného snižování pevností betonu. [10], [29]

## **PŘÍMĚS:**

### **Příměsi na bázi nanomateriálů:**

#### ▪ **Nanočástice titanu**

Nanomateriály, jako nanočástice oxidu křemičitého, oxidu titaničitého a oxidu hlinitého se používají pro zlepšení mechanických vlastností cementových kompozitů, zvyšují také trvanlivost betonů a to různými způsoby. Nanočástice vytvářejí kompaktnější matici cementu s menšími krystaly hydroxidu vápenatého. Svoji velikostí mohou působit také jako výplň prázdných míst ve struktuře a tím vytvořit hutnější strukturu. [14], [15], [23]

Titan je prvek s velmi vysokou reaktivností a přispívá k větší tvorbě hydratačních produktů v matici betonu, tedy k menšímu výskytu pórů v mikrostruktuře a hutnějšímu a kompaktnějšímu betonu. Titan se do betonů přidává jen ve velmi malém množství a to do 3 %, při větším procentuálním zastoupení už nezlepšuje mechanické vlastnosti betonu. [23]

#### ▪ **Nanočástice oxidu hlinitého**

V případě použití oxidu hlinitého je zaznamenán velký vliv především na modul pružnosti betonu. Nanočástice oxidu hlinitého ale také zvyšují zbytkové pevnosti betonu v tlaku (až o 16 %). Oxid hlinitý se dává jen ve velmi malém množství a to max. 1 %, v případě vyšší dávky nedochází ke zlepšení zbytkových pevností betonu. Cementy s obsahem oxidu hlinitého se nazývají hlinitanové cementy, ovšem u těchto cementů vzniká problém při použití v konstrukčních betonech – konverze  $C_3AH_6$  (dominantní hydratační produkt hlinitanového cementu) na  $C_2AH_8$  – vznik pórovitější struktury a v důsledku až ztráta únosnosti konstrukce. [24].

### **Polymerní příměsi:**

#### ▪ **Polymery**

Polymerní příměsi se používají ke zlepšování vlastností cementových kompozitů, tedy lepší zpracovatelnosti. Účinky se porovnávají při pevnostních zkouškách kompozitů na bázi portlandského cementu s polymery a bez polymerů. Ve srovnání s běžnou maltou jsou pevnosti v tahu za ohybu vyšší než u běžné malty, zato pevnost v tlaku je téměř neměnná. Množství povrchově aktivního činidla potřebného k dosažení stejné zpracovatelnosti je snížena právě použitím polymerní příměsi. [27]

## Vlákna:

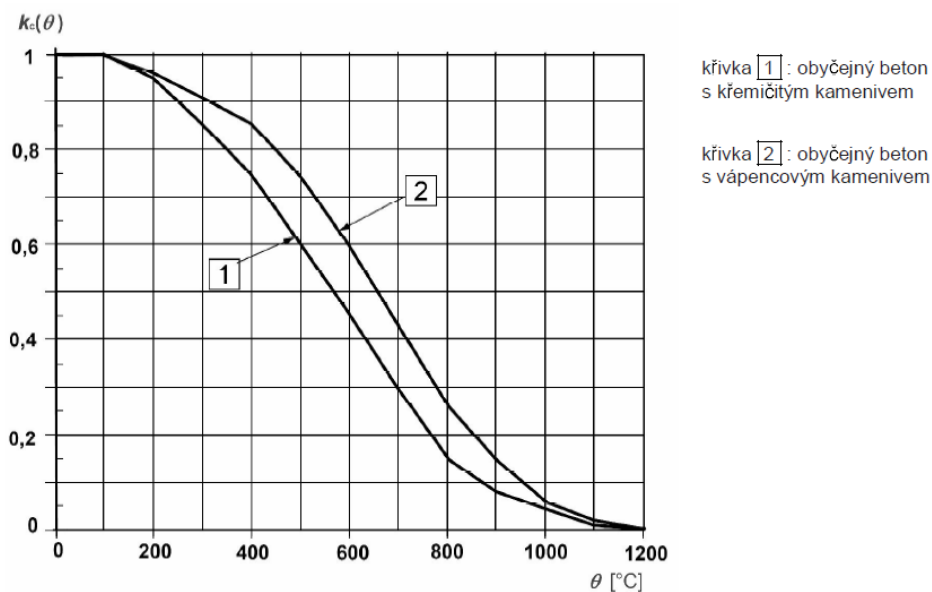
### ▪ Polymerní vlákna

Mohou být vyrobena z různých druhů polymeru: polypropylenu, polyethylenu, polyesteru, nylonu, PVA, polyakrylátu apod. Polymerní vlákna potlačují a kontrolují tvorbu trhlin v betonu (více tenkých rovnoměrně rozdělených trhlin), a zvyšují odolnost betonu při požární situaci - odolnost betonu vůči ohni vytvořením dutinek v momentě jejich roztavení pro únik vody. [41]

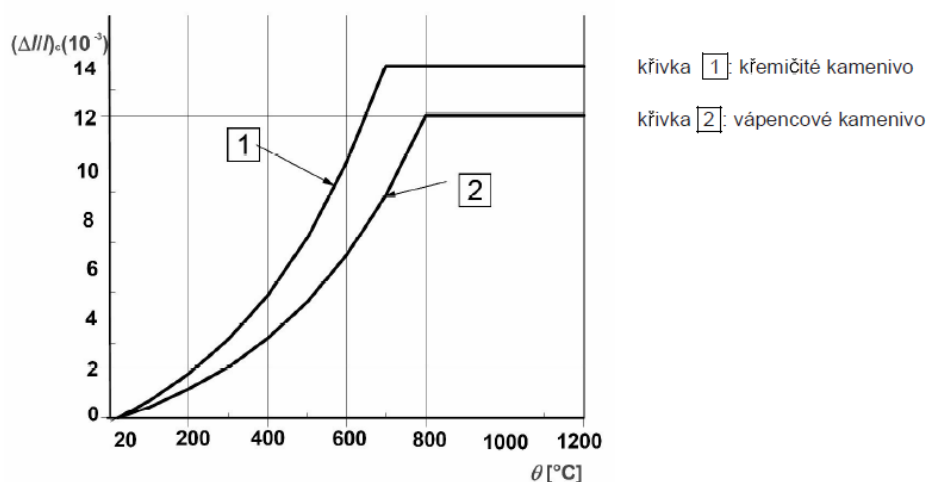
## **PLNIVO:**

### Kamenivo:

Rozdílné vlivy na beton mají rozdílné druhy kameniva jako vápenaté, křemičité a křemičito – vápenaté. Především pevnost betonu je ovlivňována druhem použitého kameniva, kdy kameniva se za zvyšující se teploty chovají odlišně a mají rozdílný vliv na pevnosti betonu v tlaku. Zjednodušeně řečeno větší vliv na redukci pevnosti betonu v tlaku v závislosti na teplotě, má kamenivo vápencové nežli silikátové (Obr. 1). Druh použitého kameniva v betonu také ovlivňuje teplotní a fyzikální vlastnosti betonu, zejména teplotní prodloužení (Obr. 2). [3], [48]



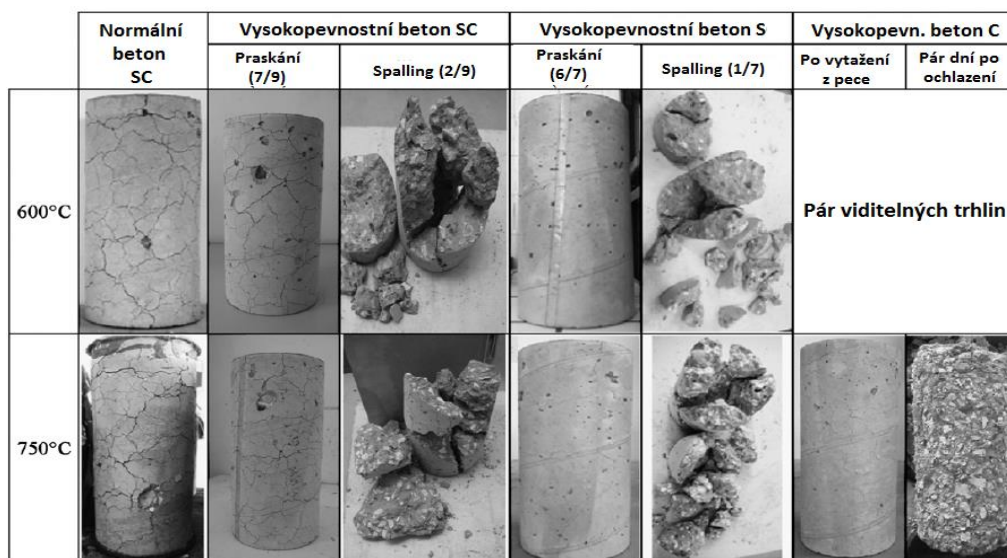
Obr. 1 – Redukce pevnosti v tlaku obvyčejného hutného betonu v závislosti na teplotě dle EN 1992-1-2 [48]



Obr. 2 – Celkové teplotní prodloužení betonu dle EN 1992-1-2 [48]

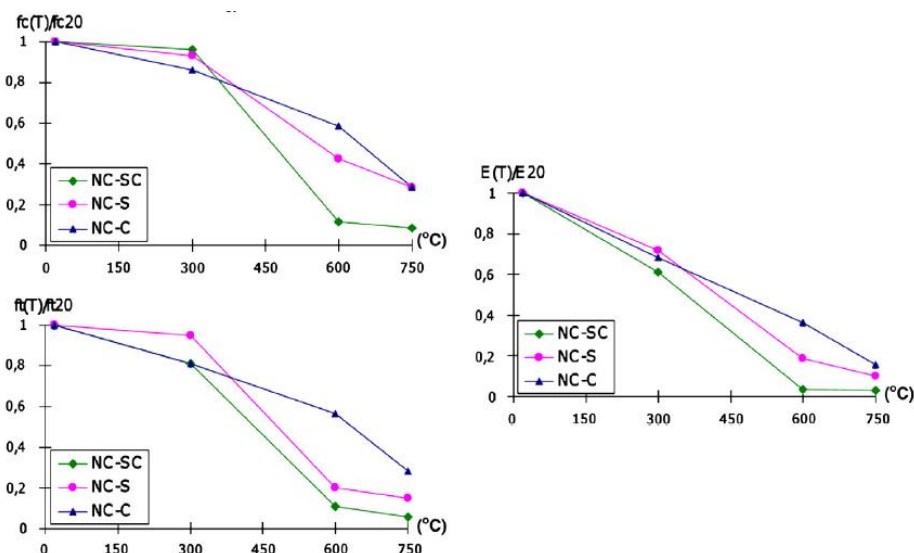
Druhy kameniva ovlivňují hlavně degradaci betonu při vysokých teplotách, kdy první trhliny lze pozorovat už při 300 °C. Nejvyšší míra poškození je u křemičito – vápenatých kameniv, na Obr. 3 lze vidět praskání a odlupování povrchu po zahřátí na 600 °C a 750 °C. Avšak u křemičitého kameniva při poměru cement : kamenivo = 1 : 7 dochází přímo k explozivnímu odprýskávání a stejně tak je tomu u křemičito – vápenatého kameniva v poměru 2 : 9. Vápenatá kameniva při zahřátí na 750 °C způsobují rozpad betonu až po několika dnech po ochlazení v důsledku rehydratace CaO na Ca(OH)<sub>2</sub>, neboť tvorba portlanditu je spojena se zvýšením objemu což vede k rozpadu betonu. [25]

Při pokojové teplotě mají betony s různými druhy kameniva podobné vlastnosti, avšak při zahřátí a ochlazení nejvyšších mechanických vlastností nabývají betony s vápenatým kamenivem [25]. Při zahřátí na 600 °C vykazují betony s křemičito – vápenatým kamenivem ztrátu pevností v tlaku vyšší než 90 %. Pevnosti v tlaku betonu s vápenatým či křemičitým kamenivem (Obr. 4) v rozmezí teplot 300 – 600 °C klesají mírně ve srovnání s betonem obsahujícím křemičito – vápenaté kamenivo. Nad teplotou 600 °C je pokles pevností v tlaku rychlejší. Pevnosti v tahu jsou vyšší u betonu s vápenatým kamenivem, neboť u křemičitého kameniva jde o těžné kamenivo – povrch kulatý a hladký – kde přilnavost cementové malty není tak velká jako u hrubého povrchu vápenatého kameniva které je drcené. Modul pružnosti je téměř stejný u betonů s kamenivem vápenatým či křemičitým, nejmenších hodnot opět dosahuje beton s křemičito – vápenatým kamenivem. [25]



SC - křemičito - vápenaté kamenivo, S - křemičité kamenivo, C - vápenaté kamenivo

Obr. 3 – Chování betonů s různým kamenivem [25]



Obr. 4 – Mechanické vlastnosti betonů s různým kamenivem [25]

## ▪ Struska

Jelikož strusku získáváme z hutní výroby při tavení oceli na 1650 °C, je struska považována za výbornou alternativu kameniva zvyšující odolnost betonů proti požáru. Avšak v kombinaci s portlandským cementem odolnost vůči požáru není nijak přesvědčivá, proto je nutno strusku použít buď jako částečnou náhradu kameniva, nebo v kombinaci s vhodným pojivem, které se strusce lépe přizpůsobí při vysokých teplotách. Strusku lze použít místo kameniva buď neupravovanou, nebo tepelně upravovanou – ošetřenou, která má vliv na lepší pevnosti betonu do cca 400 °C. Při dosažení teploty 800 °C oba typy strusky vykazují stejné snížení pevnosti betonu. Struska zlepšuje i modul pružnosti betonu, zejména struska tepelně upravovaná.

U strusky je výhodné posoudit zdroje, z nichž strusku získáváme, protože vykazují rozdílné vlivy na modul pružnosti betonu. Betony obsahující strusku mají lepší zbytkové mechanické pevnosti, obzvláště ty které obsahují strusku tepelně upravovanou. [9]

Je známo, že beton s nízkou tepelnou vodivostí má lepší požární odolnost, takže např. lehké betony lépe odolávají ohni než běžné betony. Proto jsou jako plniva často používána lehká kameniva, jako je pemza, zpěněná struska, perlit, vermikulit, ta mají v sobě vysokou odolnost vůči ohni a betony vyrobené z nich mají nízkou tepelnou vodivost. [17]

- **Pemza**

Pemza je v podstatě hliníkový silikát vyvěřelého původu s buněčnou strukturou vytvořenou procesem výbušné sopečné činnosti. Vzhledem ke své buněčné struktuře jde o lehký a izolační materiál, pemza je široce používána jako stavební materiál. Odolává teplotám až 600 °C a způsobuje pouze 5% ztrátu původní pevnosti v tlaku po vystavení vzorku vysokým teplotám. [30]

- **Perlit**

Je amorfní vulkanické sklo, vzniklé výronem lávy a rychlým chlazením, obvykle šedé, hnědé nebo modré barvy. Hlavní složkou perlitu jsou  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [16]. Při dosažení teploty přes 1000°C perlit měkne, vytváří póry, vázaná voda se uvolňuje a způsobuje rozpínání materiálu. Zrna nabývají asi 10 – 20 násobek jejich původního objemu. Perlit je pórovitá látka s nízkou objemovou hmotností (0,05 – 0,3 g/ml) a dobrou tepelně izolační schopností [17]. Expandovaný perlit je vytvořen z anorganických minerálních látek, při vystavení ohni nevytváří toxické plyny. Perlit se jako lehké kamenivo do protipožárních betonů osvědčil nejvíce, výrazně zlepšuje pevnosti betonu v tlaku ale i v tahu za ohybu. Další výhodou je snižování tepelné vodivosti betonu a to proto, že tepelná vodivost samotného perlitu je podstatně nižší než betonu. Snižuje výskyt trhlin na povrchu, a je vysoce odolný vůči vysokým teplotám (úbytek jeho hmotnosti je zaznamenán až nad teplotou 1067 °C). [27]

- **Vermikulit**

Je hornina obsahující Mg, Al a metakřemičité minerály, která vznikla zvětráváním biotitu nebo flogopitu [17]. Vyznačuje se třemi druhy vlhkosti – fyzikálně vázaná voda, voda mezi vrstvami a kombinovaná, zahřátím na teplotu 900 – 1000°C se voda

mezi vrstvami v krystalech odpařuje – tím vermikulit expanduje, to vede k nízké objemové hmotnosti. Využívá se jako žárovzdorný materiál, má nízkou hustotu a vysoký bod tání. Nedosahuje takových výsledků jako perlit, avšak také zvyšuje zbytkové pevnosti betonu. Jeho tepelná stabilita je zajištěna do teploty 1049 °C. Je oblíbený zvláště kvůli nízké objemové hmotnosti. [27]

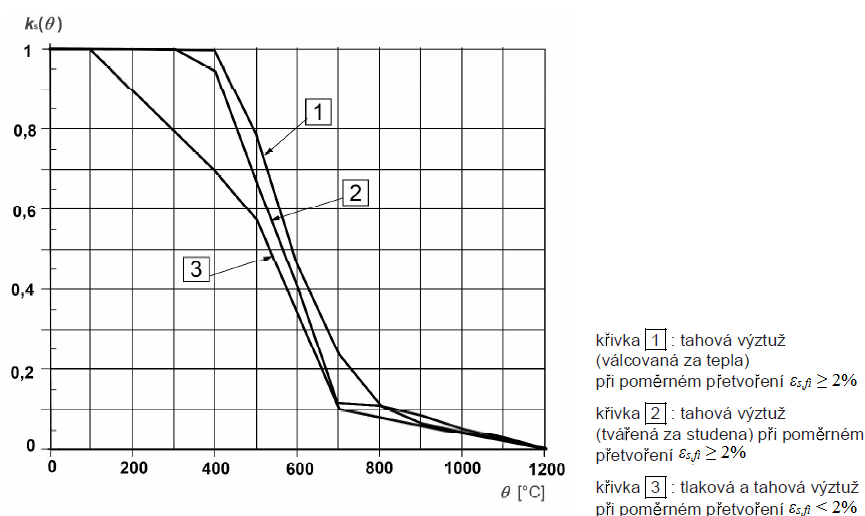
#### ▪ **Pyrofylit**

Pyrofylit je minerál, jehož obsah různých chemických složek, textura a vzhled jsou rozdílné podle umístění dolu, z něhož byl vytěžen. Je často používán v ohnivzdorných materiálech, neboť jeho tepelná odolnost je vynikající, jeho tepelná vodivost a součinitel tepelné roztažnosti jsou nízké, má také dobrou tepelnou stabilitu. [27]

### 3.1.2. Chování betonářské oceli při extrémních teplotách

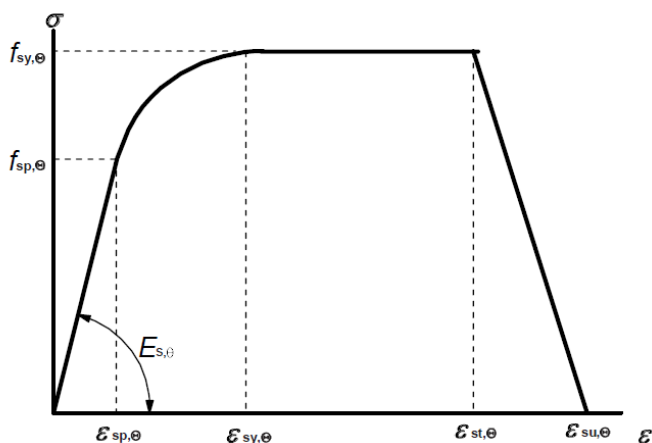
U betonářské výztuže rozlišujeme běžné betonářské oceli a speciální žárovzdorné. U běžných ocelí jsou mezní teploty užití obvykle pro oceli válcované za tepla 500 °C pro krátkodobý ohřev a 400 °C pro dlouhodobý ohřev. Pro oceli 10 505.9, Kari a např. 10 338 jsou tyto hodnoty ještě o 50 °C nižší. U speciálních žárovzdorných ocelí jsou dle ČSN EN 1992-1-1 mezní hodnoty 600 – 700 °C pro krátkodobý ohřev a 500 – 600 °C pro dlouhodobý ohřev. V současnosti jsou v ČR vyráběny speciální oceli dle německých předpisů, jako sortiment žebříkové prutové výztuže do profilu 28.

Teplota ovlivňuje vlastnosti výztuže. Má vliv zejména na pevnost výztuže. Redukce pevností za působení vysokých teplot jsou odlišné u betonářských ocelí běžných a speciálních žárovzdorných (Obr. 5). [3]



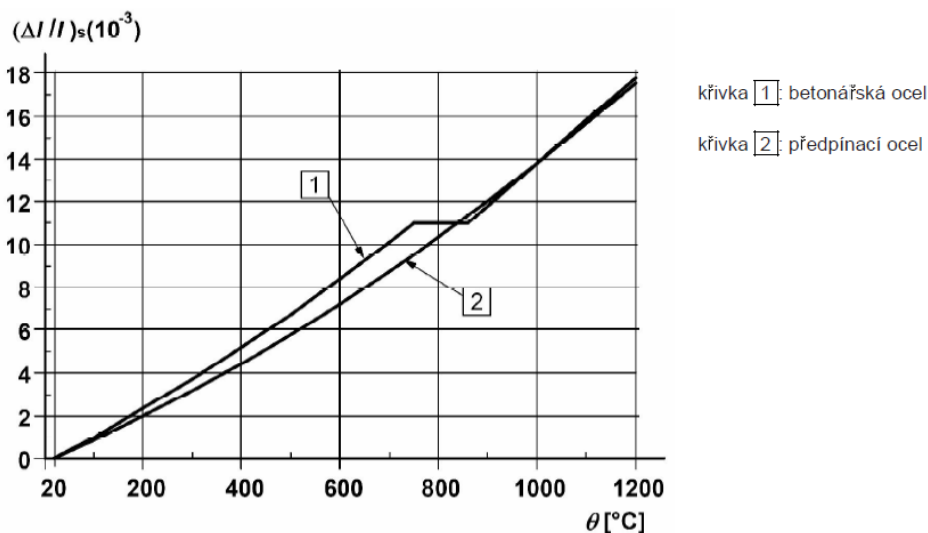
Obr. 5 - Součinitel  $k_s(\theta)$  pro redukci charakteristické pevnosti ( $f_{yk}$ ) tahové a tlakové výztuže [48]

Norma ČSN EN 1992-1-2 stanovuje pevnosti a deformační vlastnosti betonářské oceli válcované za tepla a tvářené za studena prostřednictvím pracovního diagramu (Obr. 6). Diagram je charakterizován hlavně sklonem v lineárně pružné oblasti  $E_{s,\theta}$ , dále pak mezi úměrností  $f_{sp,\theta}$  a maximálním napětím  $f_{sy,\theta}$ .



Obr. 6 - Pracovní diagram betonářské výztuže při zvýšených teplotách [48]

Teplotní prodloužení betonářské výztuže a předpínací výztuže je v závislosti na teplotě mírně odlišné. Betonářská výztuž se do teploty 800 °C prodlužuje podstatně víc než výztuž předpínací. A však po překročení teploty 800 °C se oba typy výztuží prodlužují stejně vzestupně (Obr. 7). [2] U železobetonových prvků se délková roztažnost oceli mění u betonu s trhlinkami, proto je třeba dbát na stupeň vyztužení a teplotní roztažnost betonu. [3]



Obr. 7 - Teplotní prodloužení betonářské výztuže a předpínací výztuže v závislosti na teplotě [42]



### 3.1.3. Změny v železobetonu vlivem extrémních teplot

V případě železobetonových prvků je únosnost těchto materiálů zabezpečena ocelovou výztuží vkládanou prostřednictvím tahového napětí, a tak s betonem výztuž spolupůsobí. Tato výztuž musí být chráněna tzv. krycí vrstvou betonu, ta zajišťuje trvanlivost konstrukce a v případě požáru ochraňuje výztuž před přímými účinky ohně a tedy i vysokých teplot. To proto, že ocel je na účinky vysokých teplot velice citlivá a kritická teplota betonářské výztuže je jen  $\theta_{cr} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Důležitým faktem je ohrožení soudržnosti betonu s ocelovou výztuží v důsledku zvyšující se teploty. V případě normálních teplot je soudržnost zajištěna téměř shodnými součiniteli teplotní roztažnosti  $\alpha$ . Avšak dojde-li k nárůstu teploty nad  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , pak se hodnoty součinitelů teplotní roztažnosti obou materiálů začnou zvyšovat a toto zvyšování je u oceli větší než u betonu. To způsobuje, že ocel se více rozpíná než beton, čímž dojde ke vzniku napětí a následnému postupnému snižování soudržnosti výztuže s betonem. Příhodněji působí prvky obsahující ocel válcovanou za tepla, ocel je houževnatější, dále pak prvky obsahující kamenivo, které při vyšších teplotách má podobnou hodnotu teplotní roztažnosti jako ocel (např. betony s vysokopecní struskou, vápencem či čedičem). [2]

V případě použití předpjatých betonů, tedy u prvků pro větší rozpětí, zmenšených průřezů nebo s požadavkem na extrémní namáhání či kombinace namáhání (stropní prvky, sloupy, mosty, železniční pražce, aj.), je použita výztuž předpínací. Tato výztuž je citlivější na účinky vysokých teplot nežli výztuž betonářská. Teplota kritická pro předpínací výztuž je pro dráty a lana jiná než pro pruty. Pro předpínací dráty a lana je  $\theta_{cr} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ , pro předpínací pruty je  $\theta_{cr} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Důsledkem degradace modulu pružnosti výztuže a ztráty soudržnosti mezi betonem a výztuží je pokles předpětí, čímž dojde ke zvětšení deformací předpjatého prvku, vzniku trhlin a snížení tuhosti průřezu. Prvky z předpjatého betonu se vyznačují také velkou náchylností k explozivnímu odprýsknutí, to proto, že za extrémních teplot dojde k současnému působení napětí od předpětí a vzniku vnitřního pnutí způsobeného rychlou migrací vody a páry. Takové prvky z předpjatých betonů jsou tedy mnohem častěji po zásahu požárem posouzeny za již nevyhovující a musejí být proto nahrazeny prvky novými. [2]

### 3.1.3.1. Odštěpování betonu

V okamžiku kdy se beton začne působením teplot odštěpovat, výrazně se mění teplotní odezva konstrukce a mechanická odolnost prvku. Odštěpováním je zredukován průřez prvku a může způsobit odpadnutí krycí vrstvy výztuže. Dle ČSN EN 1992-1-2 jsou rozeznávány dva druhy odštěpování betonu:

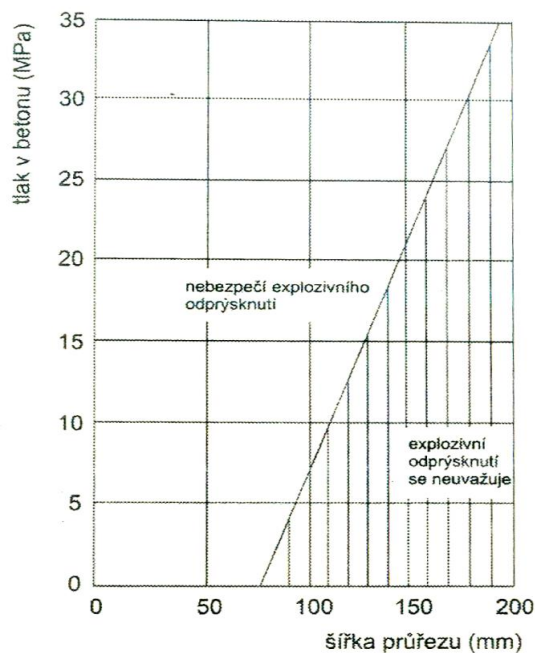
- Explosivní odštěpování
- Odpadávání betonu

**Explosivní odštěpování**, explosivní odprýsknutí – explosive spalling, je nebezpečné především pro jeho celkem brzké objevování již v raných stádiích požáru. Jeho hlavní příčinou vzniku je vnitřní pnutí, vzniklé prudkým pohybem vody a páry v průřezu v důsledku vysokého teplotního rozdílu.

U běžného betonu se explosivní odštěpování nejčastěji objevuje v prvních 20 minutách požáru. K odprýsknutí dojde při dosažení teplotního intervalu mezi 150 – 400 °C, přičemž odprýsknutí má rozsah od 0,01 m<sup>2</sup> až do několika m<sup>2</sup> a hloubky až 40 mm. [2]

Lze předpokládat, že je-li vlhkost menší nebo rovna hodnotě 3 % pravděpodobně k explosivnímu odštěpování nedojde. Takovéto vlhkosti je dosaženo vlivy prostředí X0 a XC1. Avšak je-li vlhkost v betonu větší než 3 % je nutno posoudit jak velké je riziko explosivního odprýsknutí, přičemž je brán ohled na množství vlhkosti, typ kameniva, rychlost zahřívání a propustnost betonu.

Podle Bulletin D'Information CEB lze nebezpečí explosivního odprýsknutí minimalizovat nebo dokonce zcela vyloučit a to vhodně zvoleným průřezem prvku betonu (Obr. 8). Tato idea je založena na faktu, že teplota v průřezu narůstá pomaleji, má-li tento průřez dostatečnou teplotní kapacitu. S pomalým nárůstem je samozřejmě pak spojen pomalejší pohyb vody a páry prvkem. [2]



Obr. 8 – Nebezpečí explozivního odprýsknutí v závislosti na rozměrech průřezu dle Bulletin D'Information CEB [2]

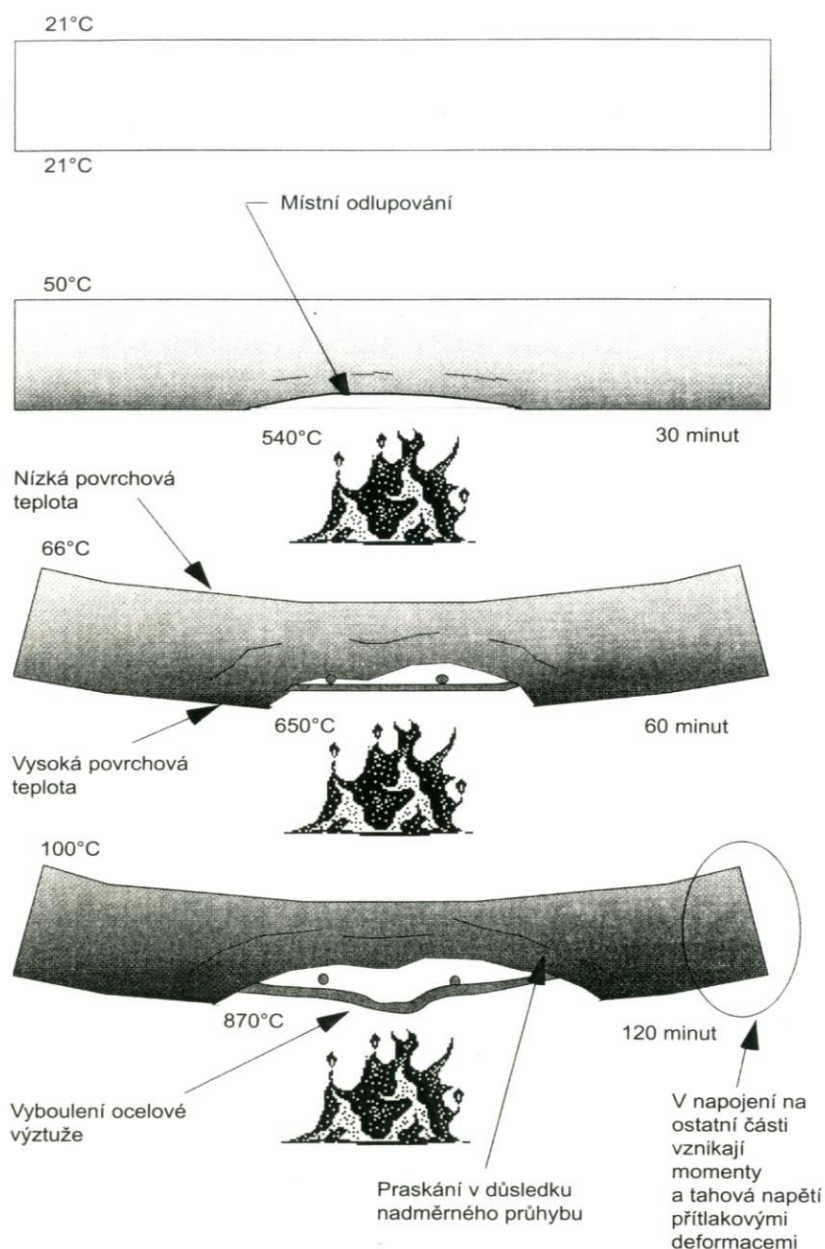
Předejít explozivnímu odprýsknutí lze zlepšením pevnosti betonu v tahu. Toho dosáhneme použitím rozptýlené výztuže buď ocelových nebo propylenových vláken. Výhodou propylenových vláken je navíc snížení vnitřního pnutí při požáru, protože při vyhoření vláken při požáru je vytvořen prostor pro pohyb vody a páry. Tento příklad snížení rizika explozivního odprýsknutí byl experimentálně prokázán v 3.3.2.1 a 3.3.3.1.

V případě konstrukce, kde je potřeba s explozivním odštěpováním počítat, pak je nutné brát v úvahu skutečnost, že dopad na nosnou konstrukci bude spojen s lokálními ztrátami krycí vrstvy jednoho vyztuženého prutu nebo svazku prutů, a v tomto případě je podstatné posoudit redukovanou únosnost průřezu. Je-li počet výztužných prutů dostatečně velký, lze počítat s přerozdělením namáhání mezi pruty bez ztráty únosnosti a stability prvku. Dostatečný počet prutů je např. u plné desky s rovnoměrně rozloženými pruty, nosníku se šířkou větší než 400 mm a s více než 8 pruty v tažené oblasti. [2]

**Odpadávaní betonu** se projevuje až v pozdější fázi požáru. Pravděpodobně jej způsobují degradace vlastností betonu a porušení soudržnosti betonu a výztuže. Vyskytuje se spíše u konstrukcí s větším jmenovitým krytím. Je-li osová vzdálenost výztuže od povrchu větší než 72 mm, je nutno použít i povrchovou výztuž sítí s průměrem minimálně 4 mm a roztečí maximálně 100 mm. [2]

### **3.1.3.2. Průběh porušení železobetonového prvku exponovaného požáru**

Při uvážení výše uvedených principů (zejména s ohledem na odštěpování, odpadávání, teplotní dilatace jednotlivých složek) lze popsat chování železobetonového prvku vystaveného působení požáru. Nejprve nastanou nerovnoměrné objemové změny v místech, které jsou vystaveny působení vysokých teplot, což má za následky zborcení, vyboulení a praskání betonu. Teplotní gradient je extrémní, od teploty okolního prostředí 21 °C až do hodnot vyšších než 800 °C v místě zdroje požáru a v místech povrchu konstrukce. Dále vlivem extrémních teplot v blízkosti zdroje požáru začne docházet k odlupování a odštěpování rychle se roztahujících povrchů betonu. Některá zrna kameniva se začnou porušovat a způsobují tak odprýskávání okolního cementového tmele. Voda v materiálu začne měnit své skupenství velmi rychle na páru, která expanzí vyvolává napětí a způsobuje odlamování malých kusů betonu. Začne probíhat přeměna na oxid vápenatý už při teplotách 500 °C, tato přeměna vyvolává rozpad betonu. Zvyšující se teplotou ztrácí ocelová výztuž své pevnosti v tahu. V okamžiku obnažení ocelové výztuže odlupováním betonu, se začne výztuž roztahovat mnohem rychleji než okolní beton, vyboulí se a ztrácí soudržnost s betonem, dokonce i v místech kde je stále obklopena betonem. Tento postup degradace ze zkoušky odolnosti proti požáru betonu 216 R v podobě betonové desky o tloušťce 18 cm s křemičitým kamenivem je schematicky znázorněn na Obr. 9. [1]



Obr. 9 - Schématické znázornění chování železobetonového prvku při požáru [1]

### 3.1.4. Shrnutí získaných poznatků

V této kapitole byla pozornost věnována především betonu, resp. železobetonu, avšak zjištěné poznatky jsou podstatné, protože uvažované správkové malty budou primárně používány na tyto konstrukce. Navíc beton představuje cementový kompozit, který je svým složením velmi blízký polymer-cementovým maltám, proto je důležité znát změny v chování betonu na základě obsahu druhu jednotlivých složek. Podstatné jsou především zjištění týkající se vlivu příměsí jako doplňujících či substitučních složek pojiva a vliv použitého plniva. Obecně je vhodné použít složky s minimálním obsahem křemene a současně použití některých druhů lehkých kameniv.

### 3.2. Správkové hmoty

Správkové hmoty jsou látky specifických vlastností, jako jsou např. minimální objemové změny v důsledku změn teploty či vlhkosti, omezený vznik smršťovacích trhlin, pevnost v tlaku, resp. v tahu za ohybu na shodné nebo mírně vyšší úrovni než podkladní beton, vysoká soudržnost s podkladem aj. Tyto hmoty se používají při speciálních aplikacích jako je obnovování jednotlivých prvků konstrukcí, zlepšení statických vlastností prvků a zvětšení krycí vrstvy nad výztuží.

#### Dělení správkových hmot dle druhu pojiva:

- **cementové malty a betony** – CC (Cement Concrete) – malty a betony, jejichž pojivem je cement,
- **polycementové malty a betony** – PCC (Polymer Cement Concrete) nebo PPCC (Polymer Portland Cement Concrete) – malty a betony s cementovým pojivem modifikované polymerními přísadami, nebo cementové betony impregnované polymerem – PIC (Polymer Impregnated Concrete),
- **polymerbetony a polymermalty** – PC (Polymer Concrete) – malty a betony, jejichž pojivem jsou polymerní pryskyřice (např. PES, SI, epoxidové),
- **injektážní hmoty a zálivky** – nejběžněji jsou to malty na bázi portlandského cementu, pro speciální aplikace jsou to epoxidové pryskyřice. [4]

V souladu se zadáním bakalářské práce je dále pozornost orientována primárně na polymer – cementové kompozity.

#### 3.2.1. Vlastnosti správkových hmot

Z hlediska zajištění maximální efektivity sanačního zákroku jsou na jednotlivé parametry správkových hmot kladeny požadavky v souladu s ustanoveními normy ČSN EN 1504-3.

#### Kvalitativní požadavky na správkové hmoty:

- vysoká soudržnost s podkladem,
- malá nasákavost, resp. dobrou vodotěsnost,
- mrazuvzdornost minimálně na úrovni T100 (popř. i větší dle konkrétních podmínek prostředí),
- objemové změny minimální v důsledku změny vlhkosti a teploty,
- omezený vznik trhlin způsobených smršťováním,

- modul pružnosti by měl být:
  - **nižší** než modul pružnosti podkladního betonu, **nemá-li** správková hmota statickou funkci,
  - **větší** než modul pružnosti podkladního betonu, **má-li** správková hmota statickou funkci,
- pevnost v tlaku, resp. v tahu za ohybu na stejné popř. mírně vyšší úrovni než podkladní beton, má-li správková hmota statickou funkci,
- odolnost vůči agresivním médiím musí odpovídat podmínkám dle konkrétního prostředí. [4]

Konkrétní požadované hodnoty jednotlivých parametrů správkových hmot dle ČSN EN 1504-3 jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 3).

**Tab. 3 – Požadované základní parametry správkových látek [4]**

Parametr	Správkové hmoty bez statické funkce		Správkové hmoty se statickou funkcí	
	Třída R1	Třída R2	Třída R3	Třída R4
Pevnost v tlaku (ČSN EN 12109)	≥ 10 MPa	≥ 15 MPa	≥ 25 MPa	≥ 45 MPa
Obsah chloridových iontů (ČSN EN 1015-17 nebo ČSN EN 14629)	≤ 0,05 %	≤ 0,05 %	≤ 0,05 %	≤ 0,05 %
Soudržnost <sup>1</sup> (ČSN EN 1542)	≥ 0,8 MPa	≥ 0,8 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 2,0 MPa
Vázané smršťování / rozpínání <sup>1,2</sup> – soudržnost po zkoušce (ČSN EN 12617-4)	Bez požadavků	≥ 0,8 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 2,0 MPa
Modul pružnosti (ČSN EN 13412 nebo ČSN EN ISO 6784)	Bez požadavků	Bez požadavků	≥ 15 GPa	≥ 20 GPa
Odolnost proti karbonataci (ČSN EN 13295)	Bez požadavků	Bez požadavků	$d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45))	$d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45))
Tepelná slučitelnost <sup>1,2</sup> zmrázování a tání - soudržnost po 50 cyklech	Vizuální prohlídka	≥ 0,8 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 2,0 MPa
náporové skrápění – soudržnost po 30 cyklech	Vizuální prohlídka	≥ 0,8 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 2,0 MPa
cyklování za sucha – soudržnost po 30 cyklech (ČSN 13687-1 až 5)	Vizuální prohlídka	≥ 0,8 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 2,0 MPa

<sup>1</sup> Uvedená hodnota je hodnotou průměrnou a jednotlivé hodnoty nesmí být menší než 75 % uvedeného požadavku.

<sup>2</sup> Maximální přípustná průměrná šířka trhliny je ≤ 0,05 mm, bez delaminace.

### 3.2.2. Polymercementové malty a betony – složení a jeho vliv na vlastnosti PCC

Polymercementové betony (malty) mají stejné složení jako klasické betony (malty), pouze u nich byla použita modifikující složka – vhodný polymer. Tento polymer se do betonu přidává jako příměs, avšak do chemické reakce s cementem nevstupuje, dochází ke vzájemnému spolupůsobení v rámci mezimolekulárních sil. [4]

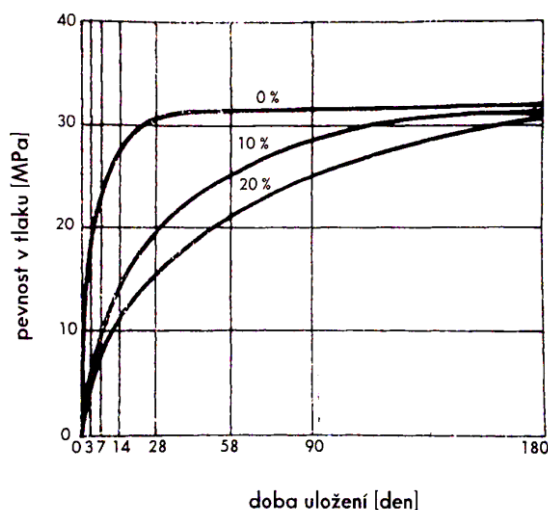
Polymerů je využíváno hlavně pro lepší zpracovatelnost čerstvé směsi, částečně se uspoří i záměsová voda, zejména však dojde ke zvýšení pevnosti ztvrdlého kompozitu v tahu a zvýšení přilnavosti k podkladu. Proto se také v praxi polymercementové směsi především používají při výrobě reprofilačních malt, lepicích hmot (např. pro obklady a dlažby) a jako polymercementové stěrky.

**Nejčastěji jsou používány látky ve formě vodní disperze, např.:**

- polyvinylacetáty (PVAC) a jeho kopolymery – nevhodné do vlhkého prostředí z důvodu podléhání hydrolyze v alkalickém prostředí
- akryláty (A) a metakryláty (MA) – větší odolnost vůči hydrolyze v alkalickém prostředí a chemicky agresivnímu prostředí (XA1)
- styrenakryláty – nejrozšířenější v současnosti pro výrobu PCC

V případě použití polyvinylacetátů či polyvinylakrylátů, lze dosáhnout hned několika zlepšení vlastností betonu. PVAC se při správném smíchání s maltovinami nesráží, a v menším množství zlepšují zpracovatelnost směsi. Taková směs má pak velmi dobrou soudržnost jak s čerstvým, tak i starým, dobře očištěným betonem. Dojde totiž k zesíťování s ionty  $\text{Ca}^{2+}$  z betonu na makromolekuly. Beton má dobrou pevnost v ohybu a nárazu, odolává opotřebení, je značně pružný, málo nasákavý, dobře vodotěsný, chemicky odolný a mrazuvzdorný (ovlivněno provzdušněním betonu). Dosažená zlepšení vlastností betonu jsou však doprovázena i negativními změnami vlastností směsi. Zejména je třeba zohlednit citlivost směsi na zpracování, kterou velmi ovlivňuje vlhkost prostředí při tvrdnutí betonu. Čím více PVAC beton obsahuje, tím klesá modul pružnosti betonu a zvětšuje se smrštění, a už jen samotná přítomnost PVAC složek zpomaluje růst tlakových pevností betonu, jak je znázorněno na Obr. 10. Velkou nevýhodou je bobtnání složek PVAC v betonu v případě, je-li prvek trvale uložen do vody, někdy dojde i ke vzniku trhlin. Obecně jsou tyto betony také nákladnější. [4]





Obr. 10 - Růst pevnosti v tlaku malt, obsahujících různé množství disperze PVAC (0, 10, 20 %) uložených na vzduchu s relativní vlhkostí 75 % [4]

V současnosti jsou nejvíce používanými polymerními disperzemi styrenakryláty, a právě styrenakryláty popř. jiné polymerní disperze, jsou používány jako přísady do konstrukčních betonů, kde nacházejí uplatnění při výrobě betonových prvků odolných vůči kouřovým plynům, chemické agresivitě, ropným produktům nebo např. slabším roztokům organických kyselin. Polymercementové betony se hojně uplatňují na výrobu rázu odolných pilot, na výstavbu vozovek, či akustických stěn, mezerovitý polymercementové beton dosahuje totiž nízké akustické propustnosti.

Polymerní disperze ale lze využít i dodatečně pro impregnaci ztvrdlého betonu, především tedy pro uzavření kapilarity a zvýšení odolnosti proti karbonataci. Impregnace se provádí nátěrem nebo nástřikem, kdy roztok polymerní disperze je zředěný (obsahuje jen 10 % sušiny) z důvodu zamezení vzniku parotěsných vrstev na povrchu betonu. Jedná-li se však o tlakovou impregnaci, dojde ke vzniku naprosto odlišné struktury materiálu. Tlaková impregnace využívá reaktoplastických polymerních pojiv, nejčastěji epoxidových, což vede ke vzniku nové kompozitní struktury, a vlastnosti těchto betonů jsou značně odlišné, proto se také tato skupina betonů označuje symbolem PIC – Polymer Impregnated Concrete. Hloubkové tlakové impregnace se využívá jako sanačního opatření k revitalizaci pevnostně problematického prvku. [4]

Polymer-cementové kompozity pro sanaci železobetonových konstrukcí obsahují zpravidla také rozptýlenou výztuž. Jedná se především o vlákna polymerní, příp. skleněná. Účelem vláken je potlačení tvorby trhlin, omezení smršťování, zlepšují

soudržnosti a houževnatosti malty - zvyšují odolnost proti nárazu a mechanickému poškození, zvyšují odolnost při požární situaci vůči ohni atd. S ohledem na odolnost vůči extrémním teplotám představuje rozptýlená výztuž na makromolekulární bázi velmi podstatnou složku, neboť při teplotách cca 160 °C se rozkládá a vytvořením dutinek, sloužících pro únik vody přeměněné na páru, sníží vnitřní pnutí malty a následnou hrozbu drolení a odprýskávání betonu. [4]

### **3.3. Polymercementové malty pro extrémní teploty**

V následujícím textu jsou uvedeny poznatky se zaměřením na problematiku aktuálního výzkumu náhrady plniva a pojiva v polymer-cementových maltách s ohledem na zvýšení jejich odolnosti vůči působení extrémních teplot. Pozornost byla zaměřena primárně na suroviny z alternativních zdrojů.

#### **3.3.1. Zahraněční výzkum v oblasti požárně odolných hmot**

#### **3.3.2. Modifikace pojiva**

Z výše uvedených poznatků plyne, že cementová matrice jako taková není příliš odolná vůči působení extrémních teplot. Disociační děje, které probíhají v této matici při zvyšující se teplotě, jsou podrobně popsány v kapitolách 3.1.1.1. Vliv vybraného složení betonu na požární odolnost betonů je rozebrán v kapitole 3.1.1.2 v sekci POJIVO. Z tohoto důvodu je nutné se dále zabývat možnostmi úpravy složení pojivové složky, resp. matrice polymer-cementových malt, jakožto správkových hmot určených do prostředí s možným vznikem extrémní nahodilé situace – požáru a následného hašení.

##### **3.3.2.1. Polymercementová malta na bázi vysokopecní strusky, porcelánu a polypropylenových vláken**

Autoři v [26] se zabývali polymercementovou maltou na bázi vysokopecní strusky, porcelánu a polypropylenových vláken. Tato malta byla vystavena prostředí, ve kterém bylo dosaženo teploty 1200 °C po dobu 60 minut. Plamen na vzorky působil 180 minut, následovalo 115 minutové chlazení a následné 1 denní odstranění zbytkového tepla v místnosti s pokojovou teplotou. Vysokopecní struska jakožto průmyslový vedlejší produkt byla použita jako náhrada cementu, avšak strusku je potřeba alkalicky aktivovat prostřednictvím přidaného křemičitanu sodného, tzv. vodní sklo. Alkalický aktivátor urychluje hydrataci strusky, a také zvyšuje

hydratační teplo, umožňuje tak použití strusky jako geopolymery, kdy vznikají hydratační produkty podobné C-S-H gelu – C-A-S-H gel. Náhrada cementu struskou (včetně aktivátoru) byla provedena v množství 0, 50 a 100 %. Tímto bylo docíleno dvou typů matic. V první řadě se jednalo o polymer-cementovou maltu, jak je uvedeno v názvu publikace. Dále pak o hmotu s alkalicky aktivovanou maticí a kombinace cementu s alkalicky aktivovanou struskou. Jako modifikační složka pojiva byl použit porcelán, porcelán vytvořil hustou strukturu při působení vysoké teploty. Pro vyztužení byla do receptury přidána polypropylenová vlákna, ta snižují tlak par uvnitř malty svým roztavením při cca 160 °C a následným vytvořením sítě kanálků uvnitř malty eliminují praskání malty a její drolení a tím zlepši požární odolnost. [26]

Ze studie lze vyvodit následující závěry:

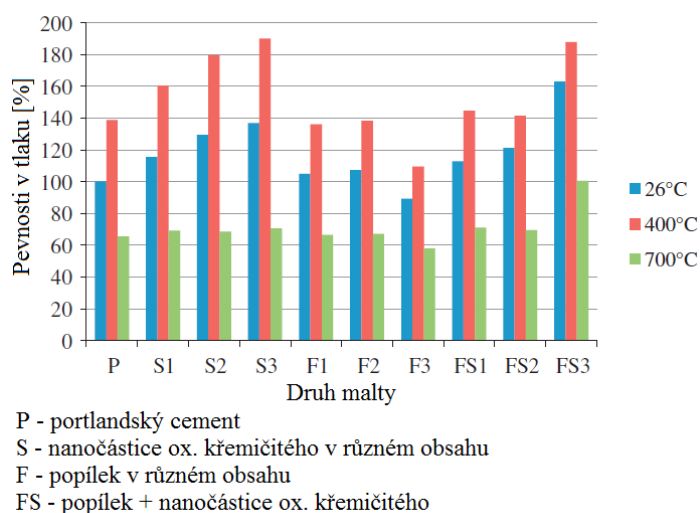
1. Úplná náhrada cementu vysokopeční struskou způsobila vysoké pevnosti v tlaku, kdy tyto pevnosti byly zlepšeny dlouhodobě. Dlouhodobé zlepšení pevností způsobila latentně hydraulická aktivita strusky a přispěla k tomu také jemná frakce strusky, která vedla k vytvoření vyšší hustoty směsi.
2. Přidaný porcelán zvýšil zbytkovou pevnost po požární zkoušce. Zvýšení pevností bylo v tomto případě způsobeno vytvořením skelné fáze porcelánu při působení vysokých teplot.
3. Přidání polypropylenových vláken účinně zabránilo výbušnému drolení protipožární vysokopevnostní polymer-cementové malty, ale vlákna měla jen malý vliv na zvýšení zbytkové pevnosti v tlaku.
4. Směs obsahující 0,1 % polypropylenových vláken, 15 % porcelánu a 100 % vysokopeční strusky jakožto substituce cementu splnila požadavek na pevnost v tlaku a projevila vynikající požární odolnost. [26]

### **3.3.2.2. Malty s vysokým obsahem popílku a nanočásticemi oxidu křemičitého**

Ve studii [22] byl cement nahrazen popílkem v kombinaci s nanočásticemi oxidu křemičitého pro výrobu vysokopevnostní malty s vysokými zbytkovými pevnostmi po vystavení vysokým teplotám. Vzorky byly vystaveny zkoušce pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu, dále XRD, TGA, SEM a BET analýzám.

V této studii se stanovoval vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu malt obsahujících koloidní nanočástice oxidu křemičitého a vysoké množství popílku jako náhrady cementu. Závěry byly následující:

1. Nahrazení cementu popílkem a obsah nanočástic oxidu křemičitého způsobuje vysoké pevnosti malty a rovnocenné zbytkové pevnosti po vystavení vzorků teplotě až 700 °C.
2. Malty na bázi popílku a nanočástic ox. křemičitého vykazovaly stabilní mikrostrukturní stav po vystavení teplotám do 400 °C, zatímco u vzorků vystavených teplotě vyšší než 400 °C došlo k výraznému rozkladu hydratačních produktů (Obr. 11), což má za následek extrémní zhoršení pevností materiálu.
3. Malty obsahovaly póry menších rozměrů a jejich počet byl také výrazně snížen obsahem nanočástic oxidu křemičitého a popílku. Toto zjištění bylo provedeno měřením množství pórů v materiálu po vystavení vysoké teplotě.
4. XRD analýza ukázala, že mezi nanočásticemi oxidu křemičitého, popílkem a křemičitanem vápenatým (vzniklým odvodněním křemičitanu vápenatého hydrátu nad teplotou 700 °C) vznikají nové vazby, které mohou mít za následek zvýšené zbytkové pevnosti vzorků vystavených teplotám nad 700 °C. [22]



Obr. 11 – Zbytkové pevnosti v tlaku po 28 dnech [22]

### 3.3.2.3. Vysokopevnostní malta na bázi nanočástic oxidu hlinitého

Výzkum v [24] se zabýval vysokopevnostní maltou s nanočásticemi oxidu hlinitého. Posouzen byl především vliv zvýšené teploty na chemické složení, strukturu a mechanické vlastnosti malty. Malty obsahovaly 1%, 2% a 3% náhradu cementu

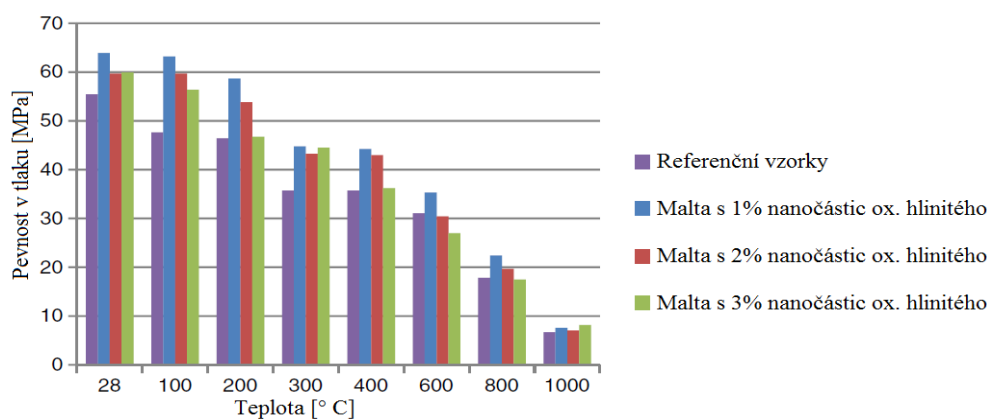
nanočásticemi oxidu hlinitého a poté byly vystaveny teplotám až 1000 °C. Na vzorcích byla stanovena zbytková pevnost v tlaku, relativní modul pružnosti, koeficient propustnosti a index křehkosti vzorků. Po vystavení vzorků malt jednotlivým zkouškám lze vyvodit závěry:

1. Úbytek hmotnosti měl dva stupně, první do 300 °C, a druhý od 300 °C do 1000 °C. Až do 200 °C byla hmotnostní ztráta nízká u všech vzorků, zatímco v okamžiku dosažení teploty 300 °C došlo k dramatickému zvýšení ztráty hmotnosti. Je zřejmé, že přidání nanomateriálů do malt zvyšuje hmotnostní ztráty při všech teplotách.

2. Výsledky testů propustnosti prokázaly, že 1 % nanočástic oxidu hlinitého bylo nejvíce účinné množství pro zvýšení nepropustnosti vzorků při pokojové teplotě místnosti, a dokonce i při 300 °C a 600 °C. Obsah 1 % nanočástic oxidu hlinitého snížilo plynovou propustnost až o 38 %, 31 % a 21 % při pokojové teplotě, 300 °C a 600 °C.

3. Při pokojové teplotě, obsah 1 % nanočástic oxidu hlinitého zlepšilo zbytkovou pevnost v tlaku malty až o 16 %. Nicméně, větší množství nanočástic oxidu hlinitého (více než 2 %) zbytkovou pevnost v tlaku malty snížilo zpět do původních hodnot. Po vystavení zvýšeným teplotám byla pozorována ztráta pevnosti u všech zkušebních vzorků, avšak vyšších zbytkových pevností v tlaku, než jsou původní hodnoty, bylo dosaženo v případě obsahu 1 % oxidu hlinitého a to až do teploty 800 °C (Obr. 12).

4. Tahové křivky malt s a bez nanočástic oxidu hlinitého ukázaly, že obsah oxidu hlinitého zvýšil energii absorpce tahové síly při pokojové teplotě i při zvýšené teplotě (až do 400 °C). Celkově malty měly stabilnější chování v případě obsahu jen 1 % nanočástic oxidu hlinitého ve srovnání s ostatními vzorky, v tomto případě složení směsi bylo také pozorováno zvýšení modulu pružnosti až do teploty 400 °C.



Obr. 12 – Pevnosti v tlaku různých druhů malt v závislosti na teplotě [24]

#### **3.3.2.4. Vysokopevnostní malta na bázi nanočástic titanu**

Studie [23] se zaměřila na maltu obsahující nanočástice titanu, stanovila strukturní změny malty po vystavení teplotě až 1000 °C a změny mechanických vlastností těchto malt. Testovala malty s obsahem 1 %, 2 % a 3 % nanočástic titanu. Cílem bylo stanovit propustnost malt, změny zbytkových pevností v tlaku a změny relativního modulu pružnosti v závislosti na obsahu titanu v maltě.

Výsledky ukázaly, že přidání nanočástic titanu zvyšuje zbytkové pevnosti v tlaku až o 14 % a vylepšuje modul pružnosti a absorpci energie malt až do teploty 600 °C.

#### **3.3.3. Modifikace plniva**

Z pohledu zvýšení odolnosti betonu proti požáru je nutné tuto odolnost zvyšovat nejen vhodnou pojivovou složkou, ale také prostřednictvím vhodného plniva. Vliv vybraného plniva na požární odolnost betonů je rozebrán v kapitole 3.1.1.2 v sekci PLNIVO. Proto je nutné se zabývat také možnostmi úpravy složení plnivové složky do prostředí s možným vznikem požáru.

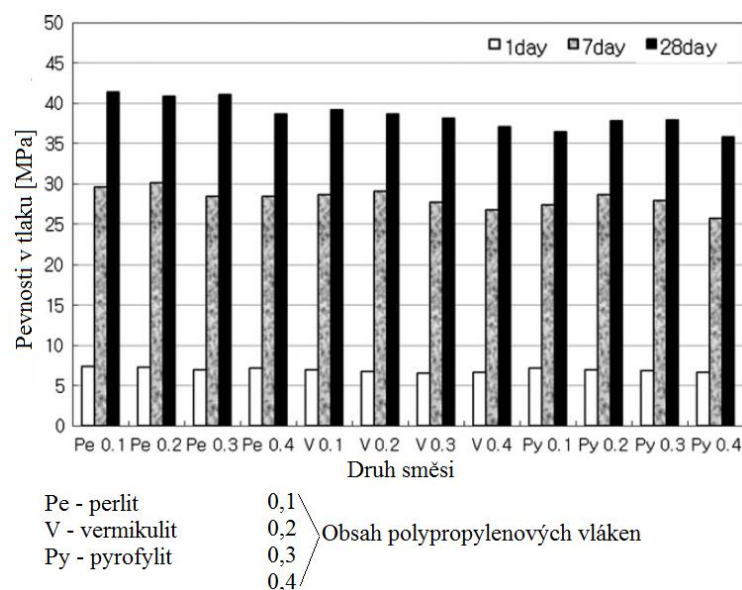
##### **3.3.3.1. Polymercementová malta na bázi lehkého kameniva**

Ve studii [27] byla vyrobena vysokopevnostní polymercementová malta obsahující polymerní vlákna v kombinaci s různými druhy lehkého kameniva, které mají výbornou odolnost proti požáru (až do teplot 1000 °C). Výzkum se zabývá vlivem množství polymerních vláken na vznik explozivního odprýskávání a cílem je prokázání účinnosti polymerních vláken a stanovení jejich optimální dávky. Dalším bodem studie je porovnání různých druhů lehkých kameniv, kdy byly použity 3 druhy kameniv: perlit, vermikulit a pyrofyilit. Byla testována pevnost v tlaku, pevnost v ohybu a tepelná vodivost.

V této studii se hodnotily tepelné vlastnosti vysokopevnostní protipožární polymerní malty vyhodnocením celkem 12 směsí: tři druhů lehkého kameniva se čtyřmi objemovými podíly polypropylenových vláken.

1. TGA analýza ukázala nejlepší stabilitu při vystavení vysokým teplotám pro směs s expandovaným perlitem, která měla nejmenší hmotnostní úbytek. Oproti tomu vysokoteplotní stabilita směsi s pyrofylytem byla nedostatečná, došlo k největšímu úbytku hmotnosti a ztrátě soudržnosti směsi.

2. Nejnižší tepelné vodivosti dosahovala směs s expandovaným perlitem, poté směs s vermikulitem, a poté směs s pyrofylitem. Z hlediska fyzikálních vlastností betonu vystaveného vysoké teplotě, lze předpokládat, že tento rozdíl je způsoben rozdílnými tepelnými vodivostmi lehkých kameniv. Expandovaný perlit vykazuje nejnižší tepelnou vodivost, a proto směs s obsahem perlitu dosahuje nejnižší tepelné vodivosti.
3. V žádné ze směsí nedošlo k výbušnému drolení během zkoušky vystavení vysoké teplotě. Množství trhlin na povrchu jednotlivých betonů bylo sníženo obsahem polypropylenových vláken. Navíc se prokázalo, že tepelná vodivost kameniva má vliv také na rychlost nárůstu vnitřní teploty ve směsi, a proto směs s expandovaným perlitem opět prokázala nejmenší výskyt trhlin na povrchu vzorků, kdežto směsi s pyrofylitem měly největší počet trhlin způsobený rychlým nárůstem vnitřní teploty a tím porušením struktury teplotním šokem.
4. Analýza výsledků zkoušek na pevnost v tlaku, pevnost v ohybu, tepelnou vodivost a termogravimetrické zkoušky ukázaly, že směs z expandovaného perlitu s vysokou tepelnou stabilitou a obsahem 0,2 % polypropylenových vláken dosahovala nejlepších fyzikálních, mechanických a tepelných vlastností (Obr. 13). [27]

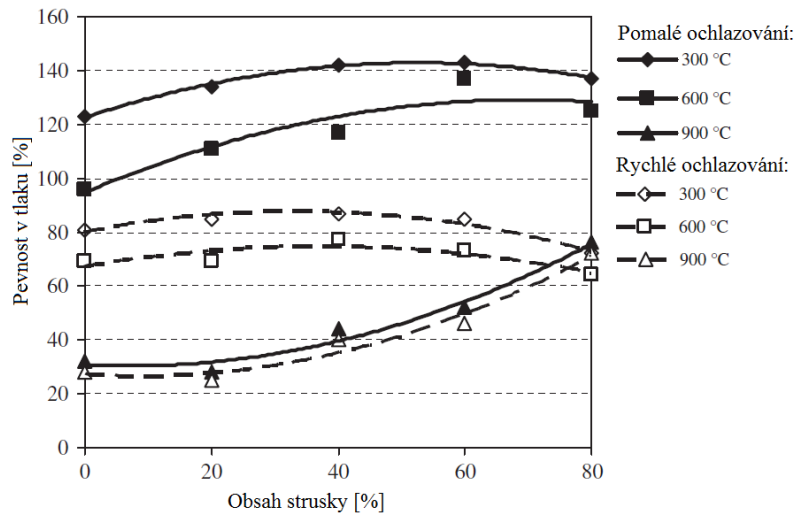


Obr. 13 – Pevnosti v tlaku různých druhů směsí s lehkým kamenivem a vlákny [27]

### 3.3.3.2. Požárně odolná malta na bázi strusky a pemzy

Výzkum v [30] se zabýval vytvořením malty vysoce odolné požáru, která obsahovala různé množství vysokopecní strusky a pemzy. Účinnost malty byla

testována až do teploty 900 °C, kdy byl pozorován vliv teploty na zbytkové pevnosti v tlaku a ohybu maltových vzorků.



Obr. 14 – Vliv způsobu chlazení na pevnost v tlaku malt s obsahem strusky a pemzy [30]

Výsledky ukázaly, že malta vystavena teplotě až 900 °C v případě obsahu 80 % vysokopecní strusky vykazuje pouze 23% a 28% tlakovou ztrátu pevnosti v případě ochlazení vzorku vzduchem či vodou. Navíc všechny malty s obsahem vysokopecní strusky nevykazovaly žádné ztráty pevnosti až do teploty 600 °C v případě ochlazení vzorku vzduchem. V případě chlazení vzorků prostřednictvím vody byly zaznamenány vyšší pevnosti ztráty než v případě chlazení vzorků vzduchem, zejména v případě ztráty pevnosti v tahu za ohybu. Ochlazování vzorků je výhodnější pomalejším tempem do teploty 600 °C, po překročení této teploty už není důležité, zda chladíme rychleji nebo pomaleji (Obr. 14). Je tedy možné konstatovat, že materiály na bázi cementu, jež jsou vystaveny ohybovému namáhání, jsou citlivější na vysoké teploty než prvky tlačené. Cementová malta s použitím pemzy a vysokopecní strusky se projevila jako vhodná pro použití jako víceúčelový izolační materiál pro konstrukce vystavené zvýšenému teplotnímu namáhání po celou dobu jejich životnosti. [30]

### 3.3.4. Shrnutí získaných poznatků

Mezi suroviny, které je vhodné použít jako alternativu pojiva polymer-cementových malt, lze za velmi výhodnou považovat strusku. V případě 100% nahrazení cementu velmi jemně namletá struska zajistí kompaktní hustou maltu odolnou teplotám až 1200 °C, ke strusce je vhodné přidat 15 % porcelánu, který po působení vysokých teplot zajistí zpevnění matrice vytvořením skelné fáze a tím



dosažení velkých pevností v tlaku, dále je vhodné použít polypropylenová vlákna k potlačení vzniku trhlin vlivem teplotního šoku. Další vhodnou pojivovou složkou je popílek, ten v kombinaci s nanočásticemi oxidu křemičitého vytváří hustou a téměř nepórovitou strukturu vysoce odolnou do teplot nad 700 °C, kdy pokles pevností je zaznamenán především po překročení teploty 400 °C. Nad teplotou 700 °C vznikají nové vazby mezi nanočásticemi oxidu křemičitého, popílkem a křemičitanem vápenatým, které mohou mít za následek zvýšené zbytkové pevnosti. V případě použití nanomateriálů je nevýhodou zvýšení hmotnostního úbytku po vystavení vysokým teplotám, proto vhodným dávkováním je jen 1 % nanomateriálů do polymer-cementových malt. Kromě nanočástic ox. křemičitého lze použít nanočástice ox. hlinitého, které zvyšují odolnost proti požáru až do teplot 1000 °C, nebo nanočástice titanu, které zvyšují také odolnost proti požáru až do teplot 1000 °C zlepšením absorpce tepla.

Suroviny vhodné pro funkci plniva pro polymer-cementové malty jsou především lehká kameniva či pemza. Z lehkých kameniv je velice vhodným expandovaný perlit, nebo vermikulit, důležitá je nízká tepelná vodivost kameniva, která zajistí nízkou rychlost nárůstu vnitřního tepla ve vzorku a tím potlačí vznik trhlin ve struktuře vzorku a zajistí odolnost vůči teplotám až 1000 °C. V případě použití pemzy jako alternativy nahrazující kamenivo v kombinaci s vysokopecní struskou je důležité ochlazovat materiál po zasažení požárem prostřednictvím vzduchu a pomalým tempem, čímž zajistíme vysoké zbytkové pevnosti materiálu. Malta s obsahem vysokopecní strusky a pemzy je vysoce odolná až do teplot 900 °C.

### **3.4. Potenciálně vhodné alternativní suroviny**

Při výběru surovin, které se jeví jako potenciálně vhodné pro náhradu pojiva a plniva správkových malt s vyšší odolností vůči extrémním teplotám, je kromě poznatků zjištěných v rámci rešerší zahraničních odborných publikací také nutné zohlednit tuzemskou aktuální situaci z hlediska produkce odpadů, nejrůznějších vedlejších produktů průmyslových výroby aj.

#### **3.4.1. Modifikace pojiva**

Tuzemské možnosti alternativy pojiva do protipožárních malt nejsou tak bohaté jako v případě zahraničních alternativ. Je možné z tuzemských zdrojů uplatnit

především aktivní příměsi jako vysokopecní struska a popílek, u nichž byl prokázán pozitivní vliv na požární odolnost – viz kap. 3.3.2.1 a 3.3.2.2. V současnosti není pro směsné cementy příliš využíván popílek z fluidního spalování. Tento by také mohl představovat vhodnou alternativu. Velmi přínosným pro zvýšení odolnosti cementových kompozitů vůči vysokým teplotám se ukázal mletý porcelán, který u nás není produkován jako odpadní materiál, ale lze se zamyslet nad vhodnými alternativami s podobnými vlastnostmi jako porcelán (viz [26]). Sice byla v rámci prostudovaných odborných publikací zjištěna jako optimální modifikační příměs pro zvyšování požární odolnosti vysokopecní struska, ovšem s ohledem na nižší cenu a vyšší množství produkce by bylo vhodné zpracovat také popílky, proto je jim mimo jiné dále věnována pozornost.

#### **3.4.1.1. Popílek**

Využíváním popílků ve stavebnictví se zabývá již několik desítek let mnoho odborných a specializovaných pracovišť. Většina idejí o hromadném využití těchto materiálů odkazuje na inženýrské stavitelství, kde je možnost využití popílků jako druhotných surovin největší. Popílky také nacházejí velké upotřebení ve výrobnách stavebních hmot, např. ve výrobě maltovin, betonu, umělého lehkého kameniva, cihlářského a keramického zboží a také při výrobě injektážních malt a litých podlah. Významné ekonomické výhody přináší využití popílků přímo na stavbách, např. při budování komunikací, letišť, železnic, přehrad aj. Za výhledové postupy aplikace elektrárenských popílků se dnes považuje výroba pórobetonu, náhrada cementu popílkem v betonových směsích a všechny druhy zemních prací a stabilizace zemin.

Uplatnění popílků při výrobě betonů v betonárnách je v ČR uplatňováno v široké míře. Popílek je k danému účelu využití dodáván z několika vybraných velkých elektráren – Dětmárovice, Mělník, Chvalětice, Opatovice, případně i ze středně velkých tepláren – Otrokovice, Plzeň. Popílek jako aktivní složku do betonu prodává i společnost Unipetrol a.s. a také Sokolovská uhelná a.s. Dodávky jsou vždy opatřeny platným certifikátem, tedy popílek je vždy zpracován jako druhotná surovina, případně výrobek, nikoliv jako odpad. Pro stanovení parametrů tohoto produktu a prokazování shody slouží evropské harmonizované normy:

- ČSN EN 450-1 Popílek do betonů – definice, specifikace a kritéria shody
- ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu

Využívání popílku do betonů je dlouhodobé, technologie jsou u výrobců betonu velmi rozvinuty.

Popílek lze uplatnit také jako složku při výrobě cementů. Podle druhů vyráběného cementu se přídavek popílku výrazně liší, avšak průměrný přídavek popílku do cementu je cca 5 %. Případnost využití popílku do cementu záleží na jeho mineralogickém složení, které se liší podle druhu spalovaného druhu uhlí. Z toho důvodu si cementárny provádějí vlastní zkoušky popílku a odebírají takový popílek, který jim vyhovuje pro vyráběné druhy cementu. Nejvýznamnější produkce cementu s obsahem popílku v České republice je zaznamenána v:

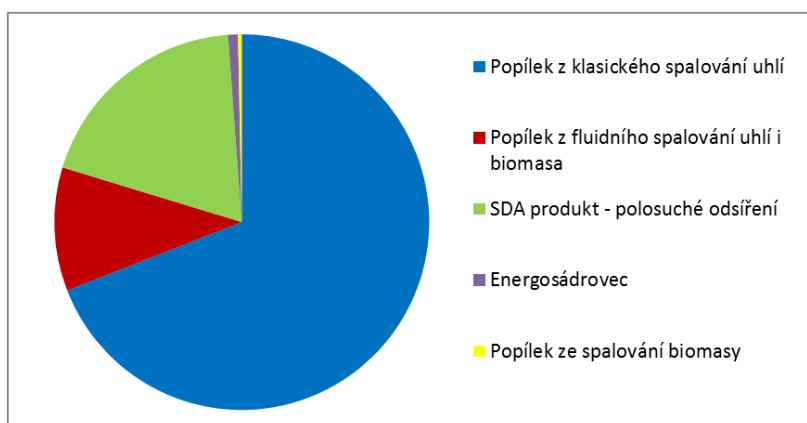
- Lafarge Cement, a.s (Čížkovice)
- Českomoravský cement, a.s. závod Radotín,
- Českomoravský cement, a.s., závod Mokrá
- Českomoravský cement, a.s., Králův Dvůr
- Holcim Práchev, a.s.
- Cement Hranice, a.s. (Hranice na Moravě)

Tyto tuzemské cementárny vyrobily v roce 2010 celkem 3 344 tis. tun cementu. A při samotné výrobě cementu bylo spotřebováno celkem 165 tis. tun popílku. Cementárny využívají kromě popílku jako pucolán také granulovanou vysokopecní strusku. Elektrárny společnosti ČEZ, a.s., největšího producenta energetických produktů v ČR, dodávají popílek společnosti Českomoravský cement, a.s. závod Radotín a závod Mokrá. Do společnosti Cement Hranice, a.s. dodávají popílek Elektrárna Dětmarovice a Tp Přerov. [42]

Využití popílku pro výrobu pórobetonu bylo v naší republice provozováno s dobrými výsledky v několika závodech. Po převzetí těchto závodů velkými zahraničními firmami byla většina provozů převedena na zpracování křemičitého písku. V současnosti dochází k určitému obnovení a výrobě významnějšího množství pórobetonu na bázi popílku se věnuje pouze závod společnosti Porfix CZ a.s. Trutnov a závod PÓROBETON Ostrava a.s. Třebovice. Jiná situace je ve Slovenské republice, kde výrobou pórobetonu na bázi popílků se zabývá závod PORFIX – pórobeton a.s., Zemianské Kostolany, dokonce v tomto závodu bylo modernizováno technologické zařízení a objemy výroby se dále zvyšují. Tento výrobce se potýká s jedním závažným problémem, a to s nedostatkem kvalitního popílku pro výrobu pórobetonu a obtížným zajištěním jeho dodávek (i z ČR).

Fluidní popílky jsou zhruba z poloviny celkového vyrobeného množství využity jako materiál pro vyplňování důlních prostor. Další využití mají ve výrobě podkladních vrstev a přechodových klínů pozemních komunikací nebo jako materiál pro stabilizaci zemin do násypů komunikací (např. budování rychlostní komunikace R6 Sokolov – Cheb → využití cca 150 000 tun fluidního stabilizátu). Fluidní popílky se však využívají také pro výrobu pórobetonu, lehkého betonu, umělého kameniva, suchých maltových směsí, speciálních tmelů, cihlářských pálených výrobků, minerálních vláken, asfaltových výrobků apod.

Celková produkce různých druhů popílku v České republice v roce 2012 je znázorněno na Obr. 15, kromě popílku je zde znázorněna i produkce dalších energetických produktů, jako energosádrovců nebo produktů získaných polosuchým odsiřováním.



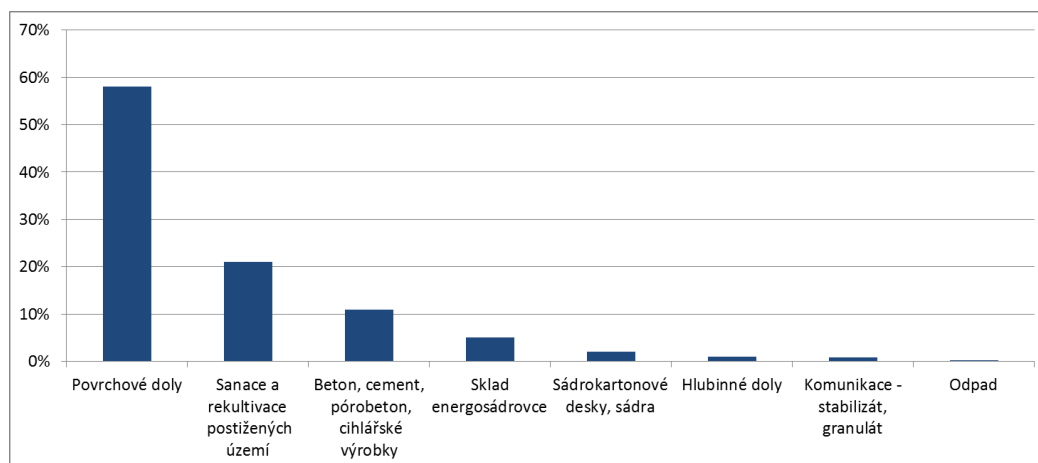
Obr. 15 – Produkce energetických produktů v ČR za rok 2012 [45]

### 3.4.1.2. Struska

Granulovaná vysokopeční struska je latentně hydraulická látka, vzniklá rychlým ochlazením vhodně složené tekoucí taveniny zásadité strusky, která odpadá jako vedlejší zplodina při výrobě surového železa ve vysokých pecích. Rychlé zchlazení taveniny vodou, zabrání její krystalizaci, takže se stabilizuje její sklovitý charakter. Hlavně struska sklovitého charakteru má při vhodném složení latentně hydraulické vlastnosti, je schopna v alkalickém prostředí reagovat za přítomnosti síranů na hydráty podobným způsobem jako portlandský slínek. Rychlým zchlazením struskové taveniny vodou vznikne produkt vzhledu hrubého písku, který má bezprostředně po granulaci 30 % vody. Toto množství se během skladování a dopravy sníží, ale při mletí strusky do cementu je nutno počítat s určitou vlhkostí.

Jemně mletá struska o frakci do 63  $\mu\text{m}$  by mohla v polymercementové maltě působit jako modifikační stabilizační složka pojiva. Jelikož je struska inertní materiál, není ji potřeba stabilizovat vápnem jako popílek. Na rozdíl od stabilizátů struska netuhne, takže ji lze na stavbách uskladňovat na skládkách. Struska se již delší dobu využívá jako ostřivo při výrobě cihlářských pálených výrobků. Další využití strusky jsou poměrně nová (posledních 3 – 5 let), např. lze struskou nahradit přírodní materiály při zásypech liniových staveb (vodovody, plynovody, kanalizace apod.) také ji lze použít i pro stavby násypů dálničních těles. Např. v letech 2005 – 2007 bylo použito při stavbě dálnice D11 cca 500 tis. tun strusky. [44]

Celkovou produkci energetických produktů v České republice (na základě poskytnutých informací od ASVEP a Teplárenského sdružení ČR) lze odhadnout na cca 13 miliónů tun ročně. Celkové využití jednotlivých energetických produktů v České republice je znázorněno na Obr.16.



Obr.16 – Oblasti využití energetických produktů v ČR [45]

Mezi nejvýznamnější české producenty lze zařadit následující společnosti:

Skupina ČEZ, Dalkia Česká republika, a.s., Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s., Elektrárny Opatovice, a.s., UNIPETROL RPA, a.s., ArcelorMittal Ostrava a.s., Pražská teplárenská, a.s., Energotrans, a.s., United Energy, a.s., Plzeňská teplárenská, a.s., ENERGETIKA TŘINEC, a.s., Momentive, a.s., Teplárna Strakonice, a.s., ŠKO ENERGO, s.r.o., Teplárna Otrokovice a.s., Alpiq Generation (CZ) s.r.o., Biocel Paskov, a.s., Mondi Štětí, a.s., Synthesia, a.s., Lias Vintířov, Teplárna Tábor, a.s., ŽĐAS, a.s., Teplárna Písek, a.s., ACTHERM, spol. s r.o., ENERGIE Holding, a.s.

Využitím elektrárenské a teplárenské strusky jako lehčiva do žáromateriálů se zabývá publikace [39]. Objem elektrárenských a teplárenských strusek je velký, jejich cena je téměř nulová a většina dodavatelů strusku prodává pouze za cenu dopravy, proto byla v publikaci zkoumána možnost využití tohoto odpadu jako lehčiva do žáromateriálů, přesněji se prostřednictvím strusky vylehčoval šamot. Vyrobený žáromateriál nejen, že uspěl, ale dokonce v některých případech dosahoval lepších výsledků než v české republice dodávaný izolační šamot. I tato možnost využití strusky je proto výhodovou.

### **3.4.2. Modifikace plniva**

Jako plnivo lze z tuzemských zdrojů použít především některých druhů lehkého kameniva – pórovitého, dále škváru.

#### **3.4.2.1. Škvára**

Škvára je odpad po spalování uhlí na roštovém topeništi, přičemž je použitelná do PCC jako pórovité kamenivo s podmínkou několikaměsíčního haldování, aby došlo k oxidaci siřníků na sírany a byly srážkami vyplaveny rozpustné sloučeniny. Použitelnost škváry je limitována obsahem spalitelných látek, síry, humusovitých látek, rozpustných solí a jiných nečistot. Sypná hmotnost frakce 0 – 16 mm má být menší než  $850 \text{ kg.m}^{-3}$ . [40]

Produkcí škváry se v české republice zabývá především společnost Elektrárny Opatovice, a. s., která dodává škváru v tuhé fázi, chemicky s obsahem převážně  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a obsahem 25 - 40 % hmotnosti vody. Škvára je dodávána ve zvlhčeném stavu buď přímo po odvodnění z výsypky nebo z mezideponie nakladačem. Je certifikována pro použití na výstavbu náspů, zásypů a obsypů, lze ji využít jako zdrsňujícího posypového materiál pro zimní údržbu komunikací a chodníků a pro výrobu cihlářských pálených výrobků. Roční produkce škváry je přibližně 110 000 tun. Ze zásobníku lze vyexpedovat 100 tun za hodinu, 450 až 700 tun za den [46]. Dalšími producenty škváry jsou v ČR Destro s.r.o., Kladno, Tereos TTD, a.s., Praha, aj.

#### **3.4.2.2. Umělé kamenivo**

V České republice je z umělých kameniv aktivní pouze výroba umělého kameniva RUGEN® od společnosti Silo Transport, a.s. Jedná se o lehké umělé kamenivo

vyrobené ze směsi popílku, pojiv, příměsí, přísad a vody. Je dodáváno převážně v kulovité formě, je však možné vyrábět i formu nepravidelnou. Jeho výhodou jsou pevnost, nízká objemová hmotnost a rychlá nasákavost, která umožňuje výrobek v případě použití do betonu a malt okamžitě aplikovat, beze změny konzistence.

Hlavním dodavatelem kameniva je spol. Teplárna Strakonice, a.s., která vyrábí kamenivo ve spolupráci se spol. Ekostat, a.s. ve Strakonících. Aktuálně můžeme získat omezené množství kameniva, z důvodu náběhu nově spuštěné výrobní linky ve firmě Silo Transport a.s., která má plánovanou kapacitu produkce cca 30.000 m<sup>3</sup>/rok. [43]

Dalším vhodným umělým kamenivem by byl **popílkový agloporit**, avšak ten není aktuálně v ČR produkován. Výroba popílkového agloporitu u nás již v minulosti byla a to v Dětmovicích, proto v současnosti je zkoumána opětovná a lepší možnost výroby tohoto druhu umělého kameniva. [36], [37], [38]

Agloporit je vyráběn jako kamenivo spékáné, nebo za studena vytvrzené. Vyrábí se z popílku za současného přídavku pojiva a vody. Metody výroby jsou buď na principu granulačních talířů, nebo granulačních válců, následuje samovýpal sbalkovaného kameniva. Výhodami je využití popílků fluidních i klasických, přičemž výsledné kamenivo dosahuje velmi dobrých vlastností, především vysoké pórovitosti a nízké tepelné vodivosti. Proto je popílkový agloporit vhodným kamenivem do tepelně odolných malt.

### **3.5. Diskuze poznatků a zjištění z teoretické části**

Rešerší globální situace v oblasti výzkumu cementových, resp. polymer-cementových kompozitů bylo zjištěno, že pro stabilizaci cementové matrice při vysokých teplotách lze využít řadu surovin. Jedná se především o minerální jemně mleté partikulární látky. Konkrétní zjištění jsou uvedena v kapitole 3.3.2. S ohledem na současnou tuzemskou environmentální situaci produkce různých vedlejších produktů lze uvažovat pro modifikaci pojiva zejména různé druhy popílků (struska – levnější varianta cementu), směsný cement pouze se struskou – vyšší množství až do 40 až 50 % dle zjištění [26]. S ohledem na zjištěné množství produkce různých druhů popílků by bylo vhodné vytvořit pojivovou směs s optimálním poměrem cementu, strusky a popílku. Dle výše uvedených zjištění by mohlo být nahrazeno až 50 % cementu struskou, přičemž by bylo vhodné ověřit, kolik z tohoto množství strusky by mohlo být dále substituováno levnější variantou – popílkem, u něhož byl také prokázán příznivý vliv

na zvýšení tepelné odolnosti. Některé druhy popílků nižší kvality, tj. méně schopných účasti na hydratačních reakcích, by mohly být využity jako inertní plniva, tedy náhrada jemných podílů kameniva malt. Zde by se mohly uplatnit jako stabilizační složky při vysokých teplotách, neboť u nich lze předpokládat lepší teplotní odolnost, než u běžně používaných kameniv. Také elektrárenská a teplárenská struska, by mohla být částečně využita jako materiál vylehčující matici a materiál vysoce teplotně odolný, avšak i tato úvaha by se musela ověřit zkouškami. Vzhledem k téměř nulovým nákladům na tento materiál by se v případě úspěchů jednalo o prospěšný materiál. Pojivo by mohlo být také substituováno jemně mletým porcelánem, který se na základě zjištěných poznatků jeví jako vhodný pro zvýšení tepelné odolnosti malt. U nás v české republice nelze získat mletý porcelán jako produkt zpracování odpadu z výroby, a to i přesto, že odpady z keramické, porcelánové a cihlářské výroby jsou v dnešní době diskutovaným a neřešeným problémem. Jako vhodné se jeví zahrnutí třídícího procesu do oblasti odpadu z těchto výrob, kde by se odpad roztřídil na jednotlivé frakce, čímž by byla eliminována případná potřeba mletí částic. Zvážit lze také možnost některých složek, které by se uplatnily jako taviva, což by napomohlo zkompaktnění struktury malty při vyšších teplotách. Kromě porcelánových frakcí, by se jako tavivo mohly osvědčit odpady z keramické výroby – keramický prach, z cihlářské výroby – cihlářský prach, nebo také odpady z výroby skla – skelné prachy, avšak tyto možnosti by bylo třeba ověřit vhodnými testy. V případě alkalické aktivace vysokopecní strusky by mohl být zcela eliminován cement, což by také značně příznivě ovlivnilo tepelnou odolnost. Co se týká plniva, bylo zjištěno, že velmi pozitivně lze z hlediska odolnosti vůči vysokým teplotám hodnotit pórovité kamenivo. Při uvážení tuzemské situace lze shledat jako potenciálně vhodné pro parciální substituci např. kamenivo na bázi teplárenské či elektrárenské škváry, což by však bylo nutné ověřit vhodnými zkouškami. V ČR byla zjištěna produkce lehkého kameniva na bázi spékaného popílku - RUGEN . Toto kamenivo se jeví na základě aktuální situace v naší republice jako jediná ekonomicky vhodná alternativa, a také z pohledu vhodnosti použití jako plniva se jedná o velmi vhodný vysoce pórovitý materiál s nízkou tepelnou vodivostí a tedy i vysokou tepelnou odolností. Vhodným kamenivem je i popílkový agloporit, jehož výroba v současnosti neprobíhá na území České republiky, avšak princip výroby je aktuálně vystaven několika výzkumům sloužícím pro případnou budoucí produkci tohoto umělého kameniva.



## 4.PRAKTICKÁ ČÁST

S ohledem na zjištění v teoretické části byla experimentálně ověřena možnost modifikace pojivové složky polymercementových malt vybranými typy aktivních příměsí, které se také podílí na zvyšování odolnosti vůči vysokým teplotám.

### 4.1.Metodika

Experimentální ověření vybraných aktivních příměsí bylo členěno do několika etap:

- návrh receptur, příprava těles a expozice malt vysokým teplotám,
- testování fyzikálně-mechanických parametrů,
- analýza vlivu příměsí na mikrostrukturu.

#### 4.1.1. Návrh receptur, příprava těles a expozice malt vysokým teplotám

Pro ověření zlepšení tepelné odolnosti malt byly vybrány tři druhy aktivních příměsí – popílek (Tušimice), vysokopecní struska (kotouč Štramberk) a mikrosilika (spol. Sika). Tyto byly použity jako příměs k pojivu v dávce 5 % a 10 %. Jako pojivo byl s ohledem na zjištěné poznatky použit směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5. Při výběru plniva bylo zohledněno jeho mineralogické složení, zejména s ohledem na krystalický křemen. Proto byl vybrán amfibolit z lokality Želešice o frakci 0 až 4 mm. Konkrétní složení receptur je uvedeno v následující tabulce (viz Tab. 4).

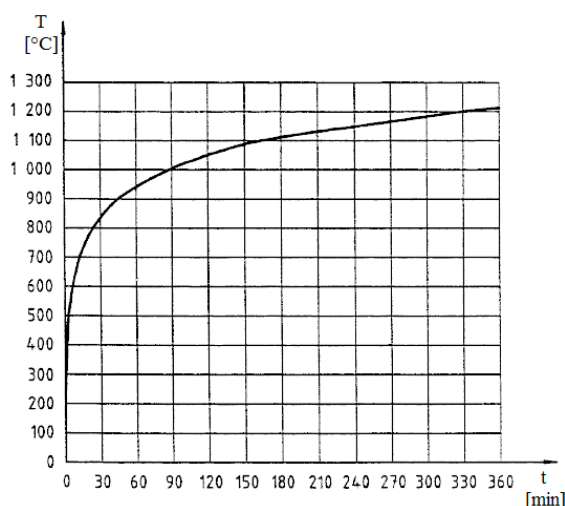
**Tab. 4 – Složení receptur**

Surovina		Množství na m <sup>3</sup>	
CEM II/B-M (S-LL) 32,5		590 kg	
0 – 4 mm amfibolit Želešice		1760 kg	
polymerizační přísada – Vinnapas 5043		18 kg	
vodní součinitel w	P05	0,52	
	P10	0,54	
	S05	0,53	
	S10	0,55	
	M05	0,54	
	M10	0,55	
	Ref	0,51	
značení receptur - příměs	P05	5 % popílku	88 kg
	P10	10 % popílku	176 kg
	S05	5 % vysokopecní strusky	88 kg
	S10	10 % vysokopecní strusky	176 kg
	M05	5 % mikrosiliky	88 kg
	M10	10 % mikrosiliky	176 kg
	Ref	referenční	-

Vzhledem k tomu, že účelem prováděných analýz bylo posouzení pojiva, nebyla použita rozptýlená výztuž, nýbrž pouze polymerní modifikační složka pojiva – Vinnapas 5043. Jedná se o velmi flexibilní dispergovaný prášek na bázi polymeru vinylacetátu a etylenu, který zajistí velmi dobrou pevnost v tahu, přilnavost zejména na organické povrchy v kombinaci s dobrou zpracovatelností.

Pro zkoušky byla zhotovena tělesa rozměrů 40 x 40 x 160 mm. Tato tělesa byla uložena 3 dny ve vlhkém prostředí a dále zbývajících 25 dní volně v laboratoři.

Zkušební malty byly exponovány v prostředí o teplotě 22 °C (volně v laboratoři – referenční tělesa), 600 °C a 1000 °C. Tepelné zatěžování probíhalo v muflové peci značky HPservis typ ESP – 10, max. teplota výpalu v peci je 1200 °C, výkon pece 5,3 kW a proud pece 16 A. Výpal v muflové peci probíhal dle křivky podobné křivce uvedené v ČSN EN 1363-1 viz Obr. 17, chlazení bylo pozvolné.



Obr. 17 – Normová teplotní křivka [49]

#### 4.1.2. Fyzikálně-mechanické zkoušky

##### ▪ Stanovení pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost cementu se zkouší dle EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Zkouší se pevnost v ohybu lámáním trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Zkoušení pevnosti v tlaku se provádí na zlomcích trámečků. (Podle těchto výsledků se cement zařazuje do jakostních tříd).

##### ▪ Stanovení objemové hmotnosti

Stanovuje se na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Kdy počáteční objemovou hmotnost se stanovuje po zvážení čerstvé směsi před zatvrdnutím a poté

se stanovuje výsledná objemová hmotnost zvážením zatvrdlých trámečků. Následuje vyhodnocení rozdílů počáteční a výsledné objemové hmotnosti těles. Zkoušku lze provést dle normy ČSN EN 12 350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.

#### **4.1.3. Mikrostrukturní analýzy**

##### **▪ RTG difrakční analýza - XRD**

Tato analýza se používá k určování struktury anorganických a organických nízkomolekulárních látek (minerálů, organických látek). Stanovuje se za použití rentgenového difraktometru. Byla provedena za účelem identifikace mineralogických fází v jednotlivých maltách.

##### **▪ DTA**

Samotnou podstatou DTA je sledování teplotních efektů ve zkoumaném vzorku, které jsou spojeny s jeho fyzikálními nebo chemickými změnami při plynulém lineárním ohřevu nebo ochlazování. Využívá se přitom aparatur pro stanovení DTA (např. TA Instruments, Mettler Toledo, PerkinElmer, aj.). Získaný záznam, tzv. termogram, vykazuje lokální extrémy (píky) odpovídající probíhajícím reakcím ve vzorku. Analýza byla provedena za účelem kvantifikace vybraných složek a mikroskopického posouzení mikrostruktury – degradace matrice či plniva (mikrotrhliny, rozklad krystalických fází – jejich zvýšená porozita atd.).

##### **▪ REM**

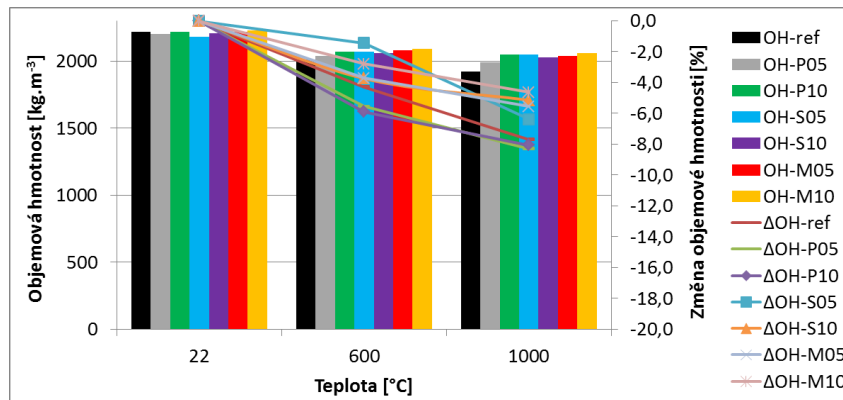
REM se provádí za pomoci rastrovacího elektronového mikroskopu, který pracuje na principu interakce úzkého svazku elektronů s povrchem vzorku. Tento způsob elektronové mikroskopie je určen pro pozorování předmětů, které nepropouští elektrony. Metoda vyniká rozsahem zvětšení, vysokou rozlišovací schopností, hloubkou ostrosti a plasticitou obrazu. Zobrazuje povrchovou morfologii sbírkových předmětů a umožňuje tak jejich identifikaci a hlubší poznání, stanovení stupně a způsobu narušení, účinnosti konzervátorského ošetření apod.

## **4.2. Výsledky zkoušek a analýz**

V následujících kapitolách jsou uvedeny výsledky a zjištění provedených testů a analýz.

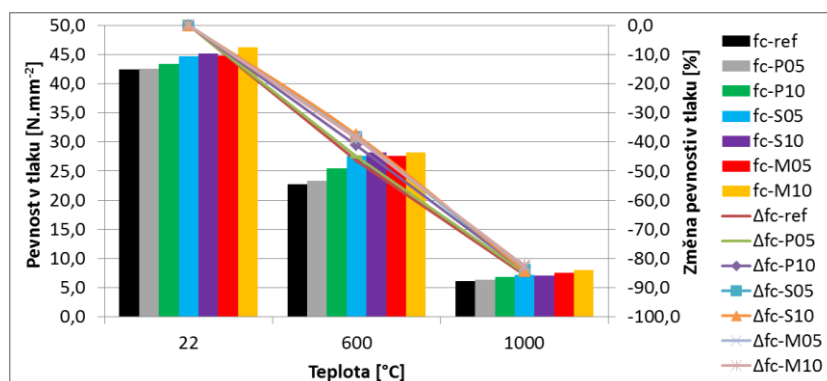
#### 4.2.1. Fyzikálně-mechanické parametry

Při hodnocení objemových hmotností a pevností (tlakových a ohybových) byly také analyzovány jejich procentuální změny – degradace vlivem zvyšující se teploty.



Obr. 18 – Objemové hmotnosti a jejich změny v závislosti na teplotě

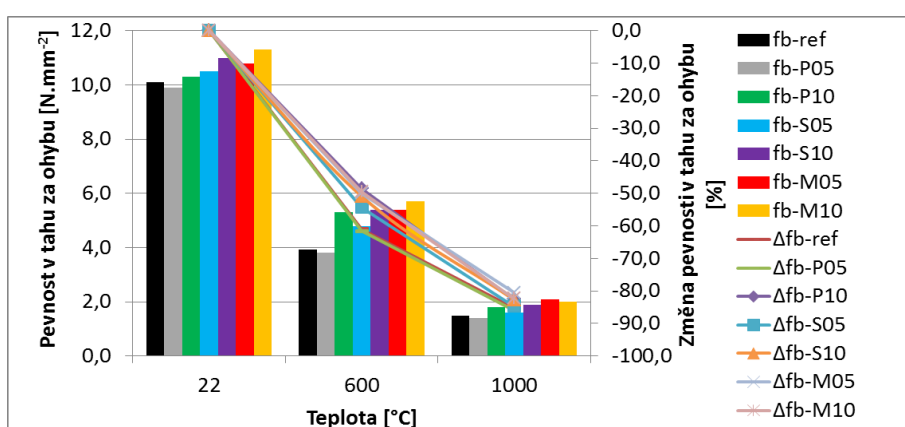
Na Obr. 18 jsou znázorněny jednotlivé objemové změny a také jejich změny v závislosti na teplotě. K největším objemovým změnám došlo u malt s obsahem popílků, v tomto případě k poklesu přispěl použitý směsný cement. Obsah strusky způsobil menší změny objemové hmotnosti a do teplot 600 °C malty s obsahem 5 % strusky zaznamenávaly nejmenší objemové ztráty. Nejlepších výsledků dosahovaly malty s obsahem mikrosiliky, nejen že vzorky dosahovaly největších objemových hmotností při všech třech teplotách, ale i změna objemové hmotnosti při výpalu na 1000 °C byla nejmenší. Struktura byla tak dokonale vyplněna částicemi mikrosiliky, že bylo dosaženo nejhustší a kompaktní struktury a tak celková objemová hmotnost vzorků byla největší. Detaily struktury malty s mikrosilikou lze vidět na snímcích z mikroskopu na Obr. 25.



Obr. 19 – Pevnosti v tlaku a jejich změny v závislosti na teplotě

Na Obr. 19 jsou znázorněny pevnosti v tlaku jednotlivých vzorků a jejich změny v závislosti na teplotě. Referenční vzorky nabývají jednoznačně nejnižších pevností

v tlaku ve všech třech případech zkoušení, přísady přiměsí tedy potvrdily zlepšení pevností v tlaku ve všech případech. Nejlepších výsledků dosahují malty s obsahem mikrosiliky, tyto vzorky mají lepší hydratační vazby v mikrostruktuře, což způsobí lepší hustotu směsi i její odolnost v tlaku. Do teploty 600 °C dosahují podobných pevností vzorky s obsahem strusky, obsah 10% vykazuje lepší pevnosti než 5% obsah, u strusky se tak projevilo, že je účinnější vyšší přidaná dávka. Pevnosti, jichž dosáhly vzorky s obsahem popílku, jsou způsobeny objemovou stálostí popílků do vysokých teplot, avšak tyto pevnosti byly v porovnání s ostatními pevnostmi jedny z nejmenších. Poklesy pevností u všech vzorků jsou způsobeny rozpadem hydratačních vazeb, čímž se značně snižuje soudržnost struktury a její odolnost vůči vnějšímu působení tlaků.



Obr. 20 – Pevnosti v tahu a jejich změny v závislosti na teplotě








Na Obr. 20 jsou znázorněny pevnosti v tahu jednotlivých vzorků a jejich změny v závislosti na teplotě. Odolnost vůči tahu byla u všech vzorků rozkladem hydratačních vazeb značně snížena. Nejnižších hodnot dosahovaly malty s 5% obsahem popílků, avšak tyto hodnoty jsou srovnatelné s referenčními vzorky, tyto hodnoty jsou způsobeny natolik nízkým obsahem popílku, že nemohl ovlivnit pevnosti v tahu. Ve srovnání s 10% obsahem, kde jsou pevnosti o poznání lepší. Velmi dobrých pevností v tahu dosahovaly vzorky s mikrosilikou a také vzorky se struskou, mikrosilika i struska podporují vznik hydratačních produktů, což se odrazilo na pozitivních výsledcích pevností.

#### 4.2.2. Mikrostruktura

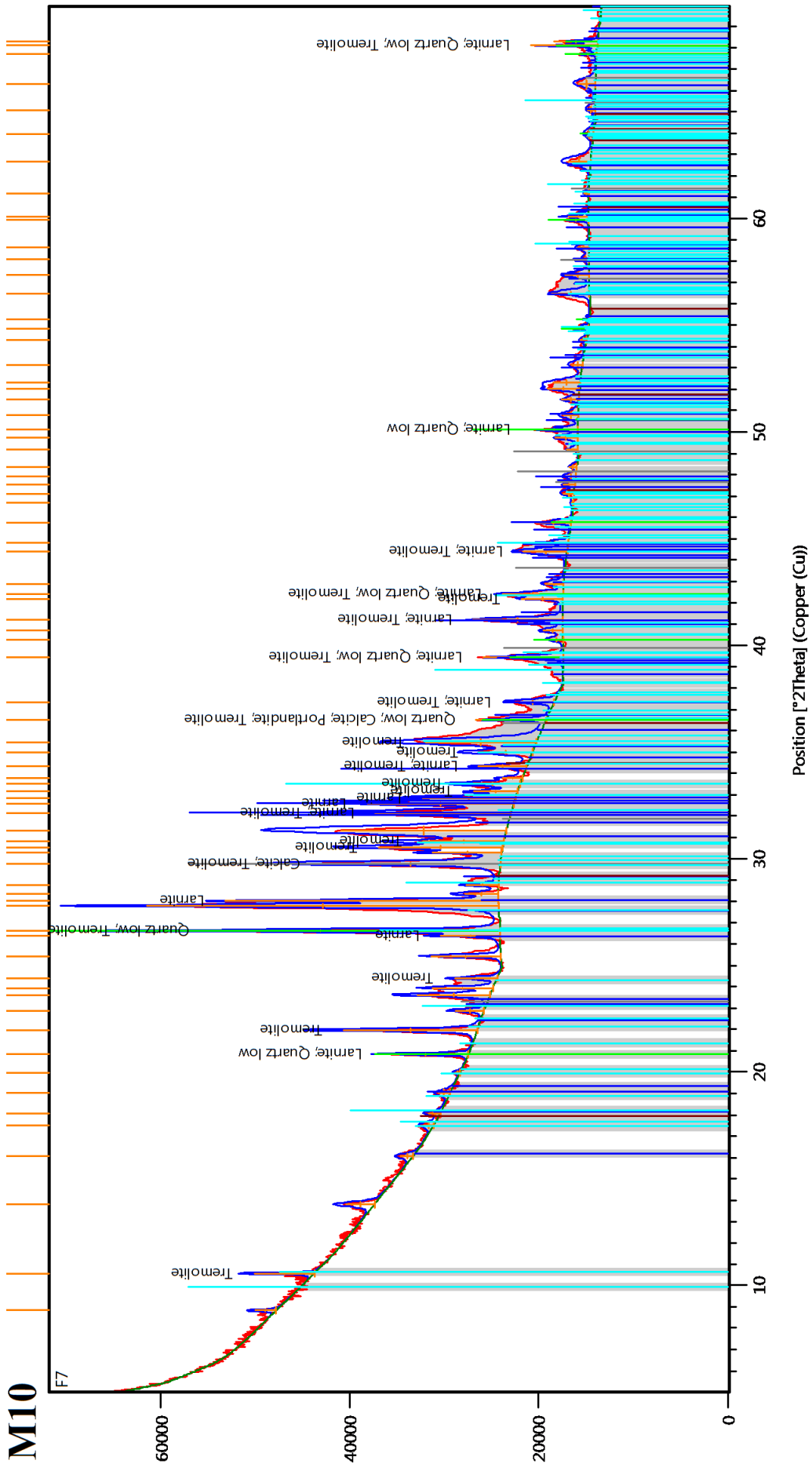
Vyhodnocování mikrostruktury bylo provedeno na základě identifikování minerálů v jednotlivých maltách pomocí XRD, následně analýzou DTA a poté byly pořízeny mikroskopické snímky jednotlivých malt.

▪ XRD

Tab. 5 – Identifikace minerálů

Receptura	22 °C	600 °C	1 000 °C	pravděpodobnost výskytu
	minerály	minerály	minerály	
P05	tremolit křemen, andesín portlandit	tremolit křemen anortit kalcit	křemen ettringit C <sub>2</sub> S	
P10	tremolit andesín, křemen portlandit ettringit	tremolit anortit křemen kalcit	anortit křemen C <sub>2</sub> S, ettringit	
S05	ettringit portlandit albit křemen	tremolit křemen kalcit C <sub>2</sub> S	anortit křemen C <sub>2</sub> S kalcit	
S10	ettringit portlandit albit, křemen	tremolit křemen C <sub>2</sub> S, kalcit	tremolit C <sub>2</sub> S křemen, kalcit, portlandit	
M05	tremolit andesín křemen anortit, kalcit	tremolit andesín křemen kalcit	tremolit křemen, portlandit C <sub>2</sub> S	
M10	tremolit andesín křemen anortit, kalcit	tremolit andesín křemen kalcit	tremolit C <sub>2</sub> S, křemen, kalcit portlandit	
Ref	křemen kalcit portlanditu C <sub>2</sub> S, tremolit	tremolit křemen kalcit, C <sub>2</sub> S portlandit	tremolit, C <sub>2</sub> S křemen kalcit portlandit	

Vzhledem k tomu, že jednotlivé typy přidaných surovin byly přidávány jen jako příměsí, tedy v malém množství a ne jako substituce pojiva, nejsou rozdíly mezi jednotlivými maltami příliš výrazné. V maltách se často opakují stejné minerály, rozdíly jsou pouze nepatrné v jejich obsahu v mikrostruktuře. Na Obr. 21 lze vidět vyhodnocení vzorku s obsahem 10 % mikrosiliky, uveden je vzorek po vystavení teplotě 1000 °C, kdy je nejlépe vidět obsah CSH fází zvýšeným pozadím na křivce. Vzhledem k podobnosti vyhodnocení vzorků, nejsou ostatní grafické záznamy vzorků v práci uvedeny, podrobné identifikace vzorků jsou uvedeny v Tab. 5.



Obr. 21 – XRD grafický záznam maľty s obsahem 10 % mikrosiliky

Podobnost výsledných grafů byla předpokládána, vzhledem k tomu že přidané suroviny byly přidávány ve formě příměsí a v takovém množství kdy nemohly nějak expresivně ovlivnit skladbu minerálů u jednotlivých malt. Všechny přidané příměsí se podílely na vzniku CSH fází, avšak opět ne o tolik intenzivněji než je tomu u referenčního vzorku. U vzorku s popínkem byla zaznamenána přítomnost ettringitu, což je patrné i na snímcích z mikroskopu na Obr. 23. Také u strusky byla přítomnost ettringitu prokázána, avšak pouze v případě laboratorních podmínek. U všech vzorků se vyskytl minerál tremolit, jedná se o člen amfibolové skupiny silikátových minerálů, strukturně podobný ettringitu, tedy jehličkovitý, sloupcovitý s dokonalou štěpností, tvrdostí 5 – 6 dle Mohse [47]. Tremolit je na některých vzorcích zaznamenán prostřednictvím mikroskopu, např. na Obr. 24, Obr. 25 a Obr. 26. U referenčního vzorku byla zaznamenána vyšší pravděpodobnost výskytu slínkového minerálu belit, což je pravděpodobně způsobeno složením směsi jen z cementu bez příměsí, která by mohla ovlivnit četnost vzniku tohoto minerálu. U vzorku s popínkem se belit neprokázal. Portlandit ve vzorcích vznikl dodatečně hydratací volného vápna z důvodu neuložení vzorků do exsikátoru (popř. neumrtvení vzorků). Kalcit je stabilní krystalickou formou  $\text{CaCO}_3$ , vzniká karbonací  $\text{Ca(OH)}_2$ , u všech vzorků se nacházel v menším rozsahu, vyskytuje se ve velmi stabilní hrubozrnné formě, proto k jeho rozkladu dochází později, než je tomu např. u nestabilního vateritu či aragonitu. Krystaly kameniva jsou rozpoznatelné např. na snímku z mikroskopu na Obr. 24.

#### ▪ DTA

Analýza DTA stanovila úbytky hmotnosti s narůstající teplotou způsobené probíhajícími reakcemi u jednotlivých vzorků. U všech byl průběh velice podobný, a na křivkách byla patrná dodatečná přítomnost portlanditu, tedy fáze rozkladu portlanditu v rozmezí 400 °C až 550 °C, který vyvolává značné smrštění betonu. Přítomnost dehydratovaného portlanditu ponechává mikrostrukturu náchylnou k zpětné rehydrataci a dalším objemovým změnám. Portlandit tak může zpětně vznikat reakcí volného vápna a vodní páry za současných objemových změn. Největší ztrátu žíháním očekávaně způsobil rozklad uhličitánů ve struktuře, přičemž se zvyšující se teplotou výpalu vzorku se celková ztráta žíháním rapidně snižovala, což je patrné z Tab. 6 a grafického záznamu na Obr. 22.



**Tab. 6 – Vyhodnocení DTA**

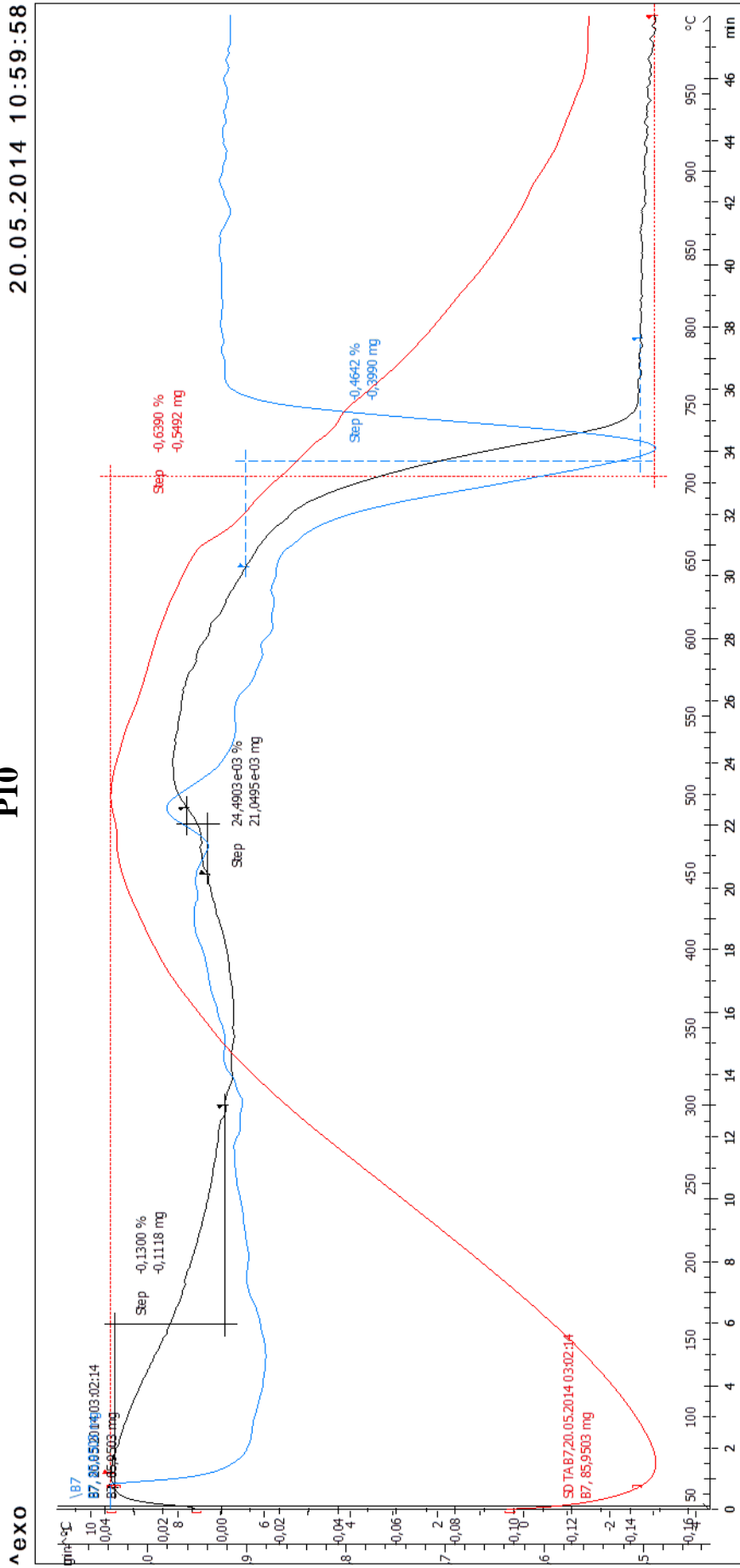
Receptura		Ref	P05	P10	S05	S10	M05	M10
22 °C	ZŽ odchodem volné vody	3,20 %	3,17 %	3,20 %	3,19 %	3,18 %	3,45 %	3,68 %
	celkové mn. portlanditu	0,50 %	0,60 %	0,70 %	0,90 %	0,90 %	0,45 %	0,31 %
	celkové mn. kalcitu	6,30 %	8,90 %	8,90 %	6,90 %	7,00 %	6,52 %	5,91 %
	celková ZŽ	<b>8,60 %</b>	<b>9,43 %</b>	<b>9,50 %</b>	<b>9,00 %</b>	<b>9,02 %</b>	<b>9,14 %</b>	<b>9,26 %</b>
600 °C	ZŽ odchodem volné vody	0,56 %	0,56 %	0,57 %	0,56 %	0,55 %	0,61 %	0,75 %
	celkové mn. portlanditu	-	0,40 %	0,50 %	0,40 %	0,40 %	0,21 %	0,14 %
	celkové mn. kalcitu	6,20 %	8,80 %	9,00 %	6,60 %	6,70 %	6,13 %	5,41 %
	celková ZŽ	<b>5,36 %</b>	<b>5,48 %</b>	<b>5,90 %</b>	<b>5,15 %</b>	<b>5,20 %</b>	<b>5,41 %</b>	<b>5,55 %</b>
1 000 °C	ZŽ odchodem volné vody	0,15 %	0,14 %	0,13 %	-	-	-	-
	celkové mn. portlanditu	-	0,01 %	0,01 %	-	-	-	-
	celkové mn. kalcitu	2,20 %	1,06 %	1,04 %	0,80 %	0,90 %	0,85 %	0,74 %
	celková ZŽ	<b>1,20 %</b>	<b>0,68 %</b>	<b>0,64 %</b>	<b>0,73 %</b>	<b>0,74 %</b>	<b>0,81 %</b>	<b>0,75 %</b>

Z Tab. 6 je zřejmé, že výsledky všech vzorků s příměsemi mají velice podobné výsledné hodnoty ztráty žháním odchodem vody, celkového množství kalcitu a portlanditu a také celkové ztráty žháním. Opět se ověřil fakt, že přidání surovin v podobě příměsí nemá rozdílné dopady na chování malty v průběhu působení teploty. Ve srovnání s referenčním vzorkem můžeme v případě vzorků vystavených teplotě 1000 °C pozorovat nepatrné změny, např. vzorky se struskou nebo mikrosilikou měly o cca 1/3 menší ztráty žháním, popílek až o cca 1/2 menší ztráty. Menší ztrátou žháním následoval méně obsáhlý výskyt smršťovacích trhlin, což přispělo ke zlepšení pevností materiálů. Pro názornost je uveden (viz) vzorový derivátogram, konkrétně vzorku s obsahem 10 % popílku vystavenému teplotě 1000 °C.

Z Obr. 22 lze vyčíst pokles křivky znázorňující úbytek hmotnosti způsobený odchodem volně vázané vody, jde o rozmezí teplot 50 – 300 °C. Kolem teploty 200 °C by měla být patrná reakce způsobená vyhořením polymerní přísady, avšak tato reakce není viditelná, protože její rozsah je tak malý, že je zastíněna ostatními endotermními reakcemi, které současně probíhaly. V rozmezí teplot 400 – 520 °C dochází k rozkladu portlanditu. I tady se potvrdila zpětná reakce vzniku hydratací volného vápna. Další viditelnou reakcí je mezi teplotami 700 – 800 °C rozklad kalcitu  $\text{CaCO}_3$ , v případě těchto vzorků vystavených teplotě 1000 °C se kalcit vyskytuje v hrubozrnné formě. Červená křivka znázorňuje endotermní a exotermní prodlevu, stanovuje spotřebu a uvolnění tepla.

20.05.2014 10:59:58

P10



STAR<sup>e</sup> SW 11.00

Lab: METTLER

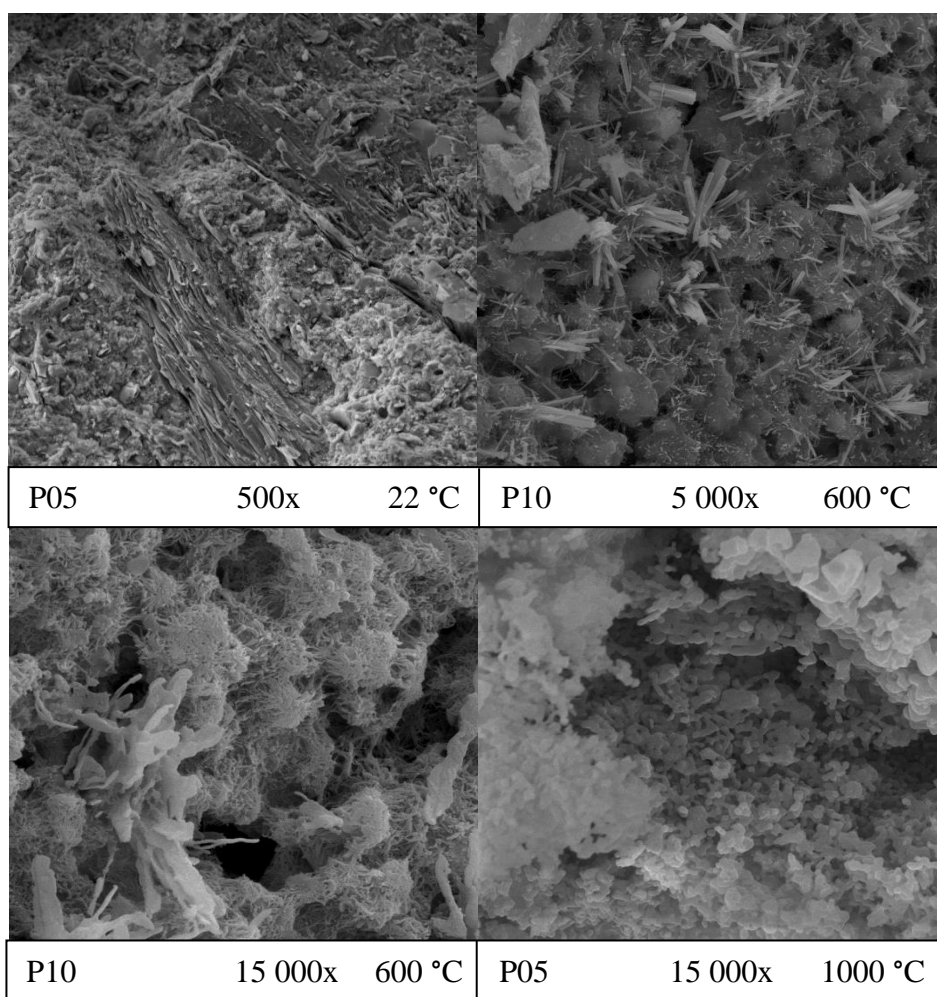
Obr. 22 – Průběh DTA derivátogramu vzorku s 10 % popílku

▪ **REM**

Poslední zkouškou bylo prozkoumání struktury daných vzorků pomocí mikroskopu MIRA TESCAN3 s max. použitým zvětšením 50 000x. Na všech snímcích je patrné že se zvyšující se teplotou se zvětšuje porozita struktury jednotlivých vzorků. U všech vzorků jsou viditelné deformační změny krystalů způsobené vzrůstající teplotou.

♦ **Receptury s obsahem popílku 5 % a 10 % - P05 a P10**

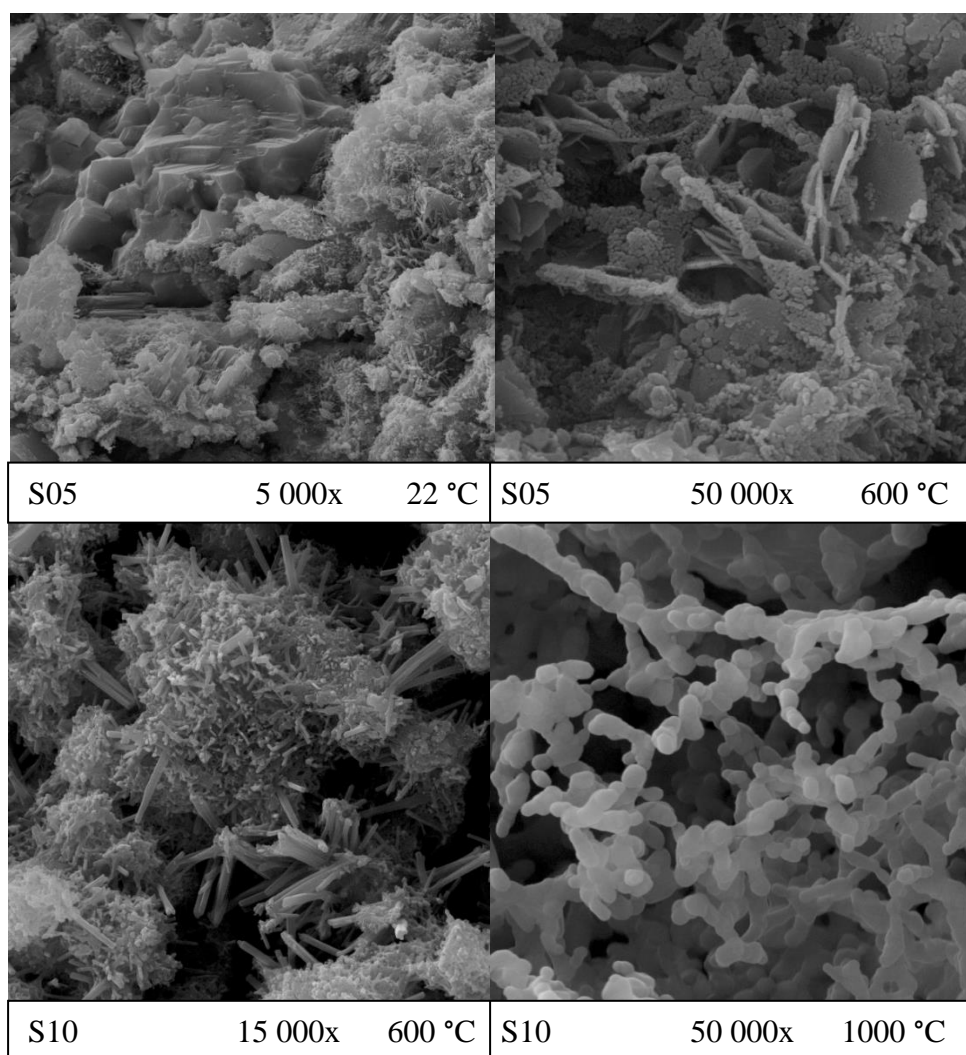
Na prvním snímku (Obr. 23) lze vidět hrubou strukturu tvořenou maltou a vpravo kus krystalu kameniva. Na druhém snímku jsou patrné jehlicovité krystaly ettringitu. Na třetím snímku je jasně rozpoznatelný rozdíl povrchu jednotlivých krystalů, hrany se částečně zaoblují, vzniká rozteklá struktura, porozita struktury je značně zvýšena. V případě posledního snímku lze vidět již úplný kapkovitý charakter roztavených krystalů, struktura je v porovnání s prvním snímkem velmi pórovitá. Snímky různých přidaných obsahů popílku měly stejný vývojový charakter, proto byly vybrány fotografie s nejzřetelnějšími rozdíly.



*Obr. 23 – Mikroskopické snímky malt s obsahem 5 % a 10 % popílku*

♦ **Receptury s obsahem strusky 5 % a 10 % - S05 a S10**

Na prvním snímku na Obr. 24 je velmi výrazně viditelný krystal kameniva – písku, na druhém snímku jsou patrné ploché deskovité lupínkovité krystaly kalcitu, na snímku třetím je znatelný výskyt sloupcovitých krystalů tremolitu, také je viditelně zvýšena porozita struktury a v případě posledního snímku jde o dosažení nejvyšší teploty, kdy jsou krásně roztaveny všechny krystaly s nově vzniklým hladkým povrchem, struktura je velmi pórovitá. Snímky různých přidaných obsahů strusky měly stejný vývojový charakter, proto byly vybrány fotografie s nejzřetelnějšími rozdíly.

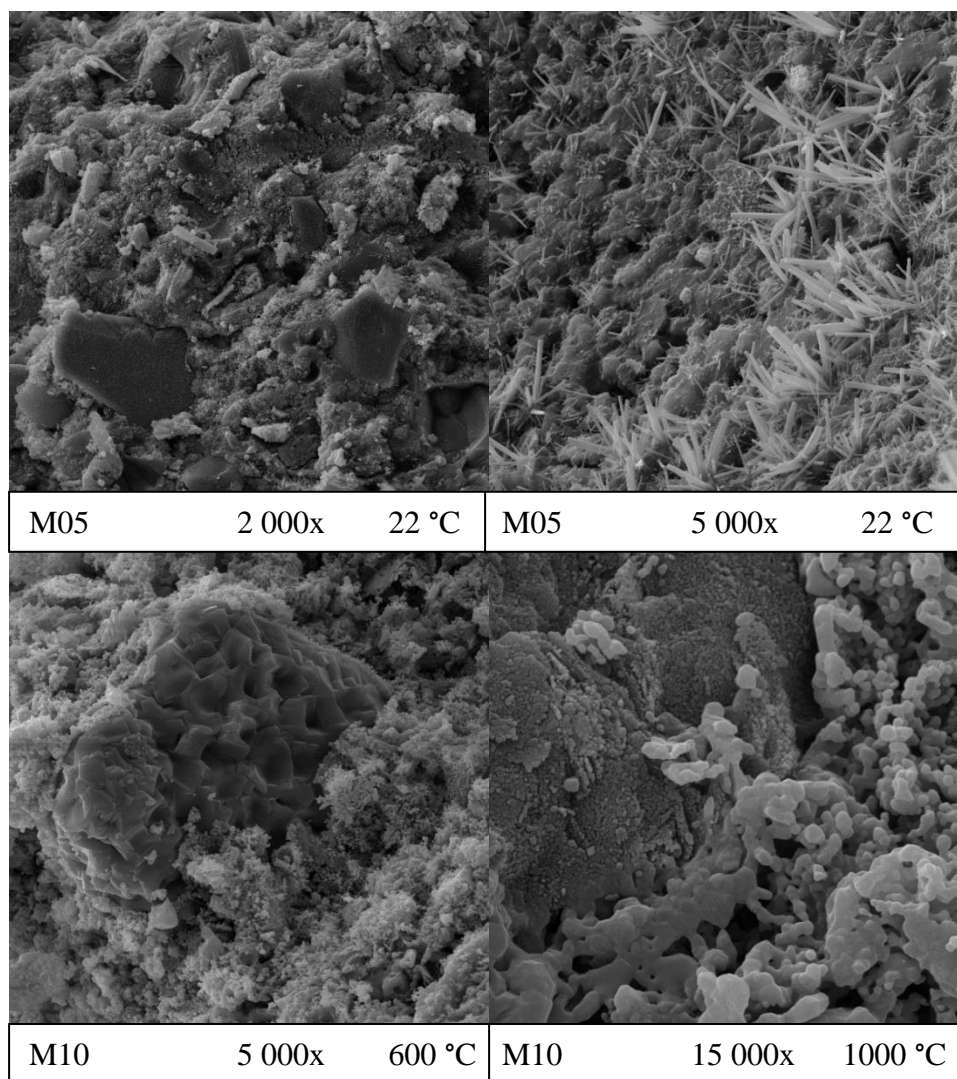


Obr. 24 – Mikroskopické snímky malt s obsahem 5 % a 10 % strusky

♦ **Receptury s obsahem mikrosiliky 5 % a 10 % - M05 a M10**

Na prvním snímku na Obr. 25 lze vidět výrazně vykreslené drobné částice kameniva, na vedlejším snímku pak opět sloupcovité jehlicovité krystaly tremolitu

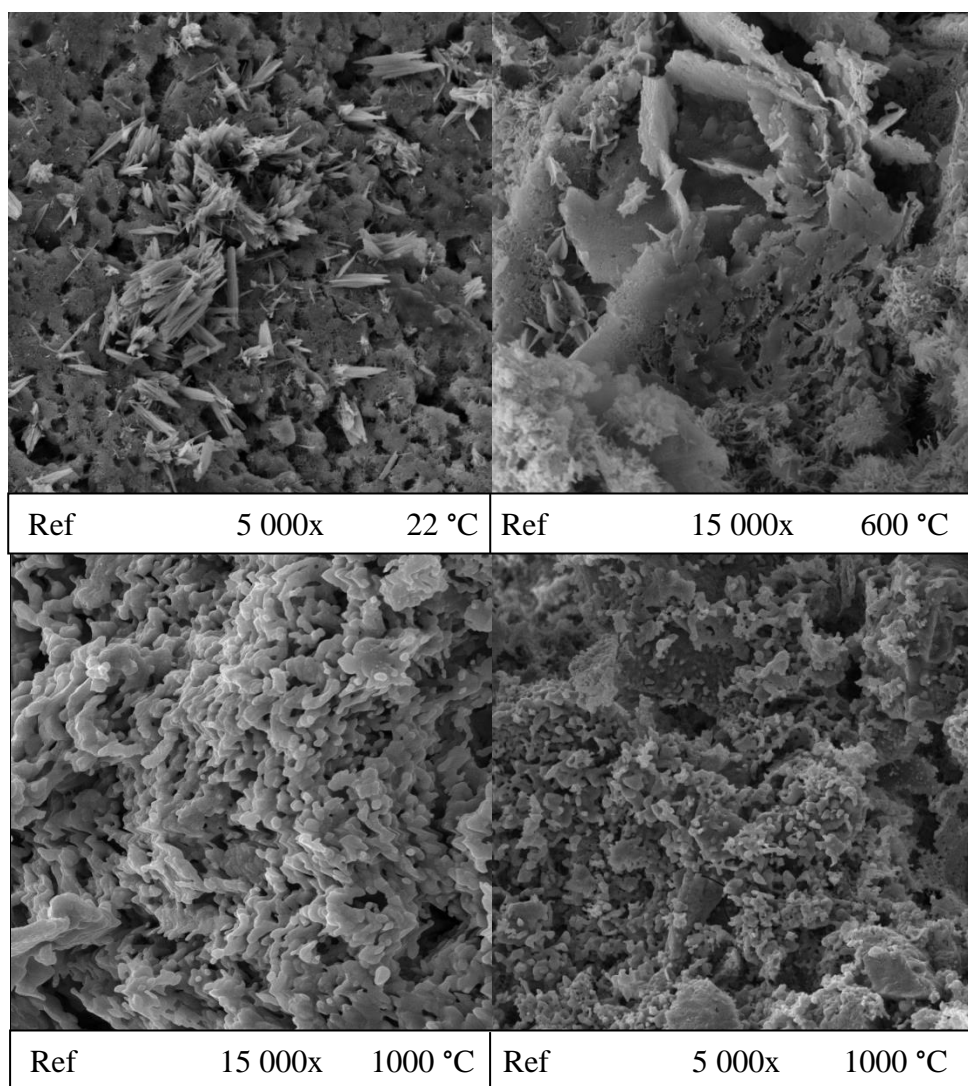
rozprostřených po povrchu struktury malty. Na třetím snímku lze zřetelně vidět, jak je ostrý povrch hran kameniva částečně zaoblen, a na posledním snímku jsou povrchy krystalů již zcela hladké a oblé – roztavené. Zřejmá je zvýšená porozita struktury vzorků při vystavení nejvyšší teplotě. Snímky různých přidaných obsahů mikrosiliky měly stejný vývojový charakter, proto byly vybrány snímky reprezentativních vzorků s nejzřetelnějšími rozdíly.



Obr. 25 – Mikroskopické snímky malt s obsahem 5 % a 10 % mikrosiliky

#### ♦ Receptura referenční – Ref

Na prvním snímku (Obr. 26) jsou výrazné krystaly jehličkovitého charakteru tremolitu, na druhém snímku je patrné, že zvýšená teplota způsobila zaoblení ostrých hran lupínek krystalů kalcitu. Na zbývajících snímcích lze vidět roztavené krystaly s oblými hranami a dokonale hladkým povrchem při vystavení teplotě 1000 °C, která mimo jiné způsobila také zvýšení porozity struktury materiálu.



Obr. 26 – Mikroskopické snímky referenčních vzorků

### 4.3. Diskuze poznatků a zjištění z praktické části

Provedené stanovení fyzikálně-mechanických parametrů doplněné mikrostrukturními analýzami prokázaly vliv dané aktivní příměsi (nikoli jako substituční složky, jak je zkoumáno ve většině z výše uvedených odborných publikací) jako stabilizační složky polymer-cementové matrice. Z přidávaných příměsí se velmi dobře projevila mikrosilika, u této příměsí byly zaznamenány lepší výsledky než např. u strusky nebo popílku. Mikrosilika způsobila velmi dobré kvantitativní vyplnění pórů struktury, prokázala se její odolnost vůči vysokým teplotám, dosáhla velmi nízké ztráty žháním a s tím spojené nižší pórovitosti struktury materiálu. Očekávaně tak dosáhla nejlepších pevnostních vlastností materiálů. V případě strusky se lépe projevilo vyšší dávkování této příměsí (v případě nahrazení cementu struskou se jedná o hodnotu 50 % a víc!).

Pevnostně obsah strusky způsobil nižší pevnosti než v případě použití mikrosiliky, ale vyšší pevnosti než v případě použití popílků. Ztráta žíháním byla nepatrně snížena, což má za následek nepatrné snížení porozity vzorků po vystavení nejvyšší teplotě. U popílků byl zaznamenán výskyt minerálu ettringitu, dále velmi nízká ztráta žíháním, obě zjištění lze potvrdit snímky z mikroskopu, kdy ztráta žíháním způsobila také menší porozitu vzorků, což přispělo ke zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností materiálu, avšak i tak byly tyto hodnoty pevností nejnižší. K těmto závěrům došlo především z porovnání velikostí frakce mikrosiliky s frakcí strusky, účinnost strusky je značně závislá na velikosti frakce. A v případě menší frakce mikrosiliky došlo ke kvalitnějšímu vyplnění sebemenších pórů ve struktuře právě prostřednictvím příměsí. Výsledky zkoušek prokázaly pozitivní vlastnosti jednotlivých příměsí, které jsou diskutovány v zahraničních publikacích. Závěrem je však nutno konstatovat, že dosažené výsledky prokázaly, že v případě dodání surovin v podobě příměsí v tak malém množství (jako 5 a 10 %) nijak expresivně nezvýší protipožární odolnosti vzorků. Důležitým faktorem ovlivňujícím efektivitu odolnosti proti požáru je hodnota přímého nahrazení cementu jinou surovinou.

## 5. ZÁVĚR

V rámci rešerší odborných publikací bylo zjištěno, že řada autorů se zabývala možnostmi využití surovin jak primárních, tak z alternativních zdrojů pro zlepšení odolnosti polymer-cementových kompozitů vůči vysokým teplotám. Existuje zde však stále prostor, který je patrný při uvážení stále se měnící vyvíjející environmentální situace včetně průmyslové výroby. Toto je evidentní také v souvislosti se zjištěním velmi úzkého sortimentu sanačních malt s vyšší odolností vůči extrémním teplotám.

Na základě průzkumu tuzemské situace v oblasti produkce různých alternativních surovin zahrnujících produkci popílků, vysokopecní strusky, umělého kameniva či škváry, lze uvažovat o využití různých druhů popílků a vysokopecní strusky pro modifikaci pojiva. Umělé kamenivo a škváru pak lze efektivně využít spíše pro modifikaci plniva. Otázkou budoucnosti je využití elektrárenské a teplárenské strusky, neboť množství tohoto odpadu v České republice je značné a ekonomické výdaje na pořízení jsou téměř nulové. Dalším uvažovaným materiálem by mohl být odpad z keramické výroby, kdy v případě roztřídění na jednotlivé frakce, by ta nejjemnější byla možnou vhodnou alternativou plniva polymer-cementových požárně odolných materiálů.

Zhodnocení ověření popílku, strusky a mikrosiliky jako modifikačních – stabilizačních složek polymercementové matrice za zvýšených teplot je ve prospěch mikrosiliky. Přidaná příměs mikrosiliky prokázala nejlepší fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů, dále stabilní chování v případě vystavení vysokým teplotám a kvalitní vyplnění pórů struktury, které vedlo k vyplnění pórů taveninou v okamžiku dosažení max. teploty a tím ke zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností. U strusky je potřeba dbát na vyšší dávkování a také použití vyšší jemnosti frakce, která ovlivňuje účinnost strusky. U popílků bylo dosaženo kvalitní husté struktury, avšak přidání popílků právě v podobě příměsí neprokázalo výrazné zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností materiálů. Ve výsledku tedy lze říci, že přidání surovin jako modifikačních – stabilizačních složek polymercementové matrice za zvýšených teplot nezpůsobí výrazné zvýšení odolnosti vůči vysokým teplotám, avšak mírné zlepšení vlastností zaznamenáno bylo.

Po shrnutí poznatků z teoretické části, zahraničních publikací a praktické části lze s jistotou konstatovat, že hodnotu odolnosti polymer-cementových kompozitů vůči požáru ovlivňuje míra přímého nahrazení cementu alternativní surovinou za současného použití vhodného plniva s nízkou tepelnou vodivostí.



## Seznam použité literatury

- [1] Emmons P. H., Emmons B. W., Drochytka R., Jeřábek Z., *Sanace a údržba betonu v ilustracích*. Brno: CERM, 1999, 334 s., ISBN 80-7204-106-1.
- [2] Kučera P., Česelská T., Matečková P., *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010, 176 s., ISBN 978-80-7385-094-4.
- [3] Šrůma V., Šrůmová Z., *Betonové konstrukce v extrémních podmínkách: sborník k semináři*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI, 2004, 148 s., ISBN 80-903501-0-0.
- [4] Drochytka, R., Dohnálek, J., Bydžovský, J., Pumpr, V., Dufka, A., Dohnálek, P., *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III*. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2012, 265 s., ISBN 978-80-260-2210-7.
- [5] Procházka J., Štefan R., Vašková J., *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. Vyd. 1. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2010, 189 s. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [6] Tanyıldızı H, Coskun A. *Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature*. Constr Build Mater 2008; 22: 2124–9.
- [7] Kolář K., Reiterman P., *Betonujeme svépomocí*, Grada, 2010, 112 s., ISBN 978-80-247-3248-0
- [8] Sičáková A., a kolektiv, *New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications*, 1. Vydání Košice, 2008, 156 s., ISBN 978-80-553-0040-5
- [9] Arslan M., *Concrete*, 1st ed. Atlas press: Istanbul; 2001.
- [10] Topçu I. B., Boga A. R., *Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete*, Mater Des 2010,31:3358–65.
- [11] Tanyildizi H., Coskun A.. *An experimental investigation of bond and compressive strength of concrete with mineral admixtures at high temperature*. Arab J Sci Eng 2008;33(2B):443–9.
- [12] Morsy MS, Shebl SS, Rashad AM. *Effect of fire on microstructure and mechanical properties of blended cement pastes containing metakaolin and silica fume*. Sil Ind 2009; 74(3–4).
- [13] Jianxin M., Schneider H., *Properties of ultra-high-performance concrete*. LACER 2007;7:25–32.
- [14] Farzadnia N., Abang Ali A. A., Demirbog R., *Development of nanotechnology in high performance concrete*, Adv. Mater. Res. 364 (2012) 115–118.

- [15] Sanchez F., Sobolev K., *Nanotechnology in concrete-a review*, Construction and Building Materials 24 (2010) 2060–2071.
- [16] Zongjin L, Xiangming Z, Bin S. *Fiber – cement extrudates with pearlite subject to high temperatures*. J Materials Civil Engineering 2004; 16(3):221–9.
- [17] Neville A. M., *Properties of Concrete*, Longman, New York, 1995.
- [18] Ilker B. T., Burak I., *Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing pearlite*. Building Environmental 2007;42(10):3540–6.
- [19] Annerel E., Taerwe L., *Approaches for the assessment of the residual strength of concrete exposed to fire*. In: Rodrigues J.P.C., Khoury G.A., Hoj N.P., editors. In: *Proceedings of the international workshop: fire design of concrete structures, from materials modelling to structural performance*. Coimbra: University of Coimbra; 2007. p. 489–500.
- [20] Akcaozog’lu K., *Microstructural examination of concrete exposed to elevated temperature by using plane polarized transmitted light method*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 8 s.
- [21] Netinger I., Rukavina M. J., Mladenovič A., *Improvement of post-fire properties of concrete with steel slag aggregate*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 9 s.
- [22] Ibrahim R. Kh., Hamid R., Taha M. R., *Fire resistance of high-volume fly ash mortars with nanosilica addition*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 8 s.
- [23] Farzadnia N., Abdullah A. A. A., Demirboga R., Parvez A. M., *Characterization of high strength mortars with nano Titania at elevated temperatures*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 11 s.
- [24] Farzadnia N., Abdullah A. A. A., Demirboga R., *Characterization of high strength mortars with nano alumina at elevated temperatures*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 12 s.
- [25] Xing Z., Beaucour A., Hebert R., Noumowe A., Ledesert B., *Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 11 s.
- [26] Jong-Pil W., Hee-Byoung K., Su-Jin L., Joo-Won K., *Eco-friendly fireproof high-strength polymer cementitious composites*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 7 s.
- [27] Won J. P., Kang H. B., Lee S. J., Lee S. W., Kang J. W., *Thermal characteristics of high-strength polymer–cement composites with lightweight aggregates and*

- polypropylene fiber*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 10 s.
- [28] Peng G., Bian S., Guo Z., Zhao J., Peng X., Jiang Y., *Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures*. Construction and Building Materials 2008; 22: 948–55.
- [29] Cenk K., Ilker B. T., *Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar corrosion and high temperature resistance of concrete*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 6 s.
- [30] Serdar A., *Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 8 s.
- [31] Rashad A. M., Sayieda R. Z., *A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 10 s.
- [32] Baradan B., Yazıcı H., Ün H., *Durability of reinforced concrete structures*. 1sted. Izmir: DEU press; 2002.
- [33] Demir A., Topçu I. B., Kusan H., *Modelling of some properties of the crushed tile concretes exposed to elevated temperatures*. Construction and Building Materials 2011; 25: 1883–9.
- [34] Netinger I., Varevac D., Bjegović D., Morić D., *Effect of high temperature on properties of steel slag aggregate concrete*, Construction and Building Materials, Elsevier Science, vědecký článek, 7 s.
- [35] Phan L., *Spalling and mechanical properties of high strength concrete at high temperature*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, vědecký článek, 14 s.
- [36] Černý V., Kulísek K., *Possibilities of natural gas decreasing in agloporit production*, Výzkumný ústav stavebních hmot. 2008, 978-80-254-2029-4
- [37] Černý V., *Agloporit na bázi fluidních popílků*, PCHE PetroCHemEng, 2008 Odpadové fórum, 978-80-02-02011-0
- [38] Černý V., *Zapalování vsázky pevnými palivy při výrobě agloporitu*, JUNIORSTAV 2008, VUT BRNO, 978-80-86433-45-5
- [39] Nevřivová L., *Teplárenská a elektrárenská struska jako lehčivo v tepelně izolačních žáromateriálech*, sborník, 2006, 80-8069-747-7
- [40] Matoušek M., *Stavební hmoty: Určeno pro posl. fak. stavební. Technologie výroby pórovitých kameniv a lehkých betonů z nich připravených, Díl 2*, VUT, 1974, 119 s.
- [41] *Polymerová vlákna do betonu*, [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/polymerova-vlakna-do-betonu>

- [42] *Svaz výrobců cementu ČR*, [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.svcement.cz/>
- [43] *Umělé kamenivo*, [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.silotransport.cz/umele-kamenivo>
- [44] *Struska*, [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.silotransport.cz/struska>
- [45] Asociace pro využití energetických produktů (ASVEP) a Teplárenské sdružení České republiky (2012), Pozn. obě sdružení reprezentují producenty cca 97% produkce energetických produktů v ČR 2012
- [46] *Elektrárny Opatovice*, [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: [http://www.eop.cz/produktyaslužby/vdl\\_struska.php](http://www.eop.cz/produktyaslužby/vdl_struska.php)
- [47] *Atlas minerálů*, [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: [mineraly.sci.muni.cz/inosilikaty/tremolit.html](http://mineraly.sci.muni.cz/inosilikaty/tremolit.html)
- [48] ČSN EN 1992-1-2, Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru
- [49] ČSN EN 1363-1: Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky
- [50] ČSN EN 1504-3: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce
- [51] ČSN EN 12190: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt
- [52] ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti
- [53] ČSN EN 197-1 ed.2: Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [54] ČSN EN 12 350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.
- [55] ČSN EN 450-1 Popílek do betonů – definice, specifikace a kritéria shody
- [56] ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu
- [57] ČSN EN 206-1 Beton-Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Redukce pevnosti v tlaku obyčejného hutného betonu v závislosti na teplotě dle EN 1992-1-2 [48] .....	19
Obr. 2 – Celkové teplotní prodloužení betonu dle EN 1992-1-2 [48].....	20
Obr. 3 – Chování betonů s různým kamenivem [25] .....	21
Obr. 4 – Mechanické vlastnosti betonů s různým kamenivem [25] .....	21
Obr. 5 - Součinitel $k_s(\theta)$ pro redukci charakteristické pevnosti ( $f_{yk}$ ) tahové a tlakové výztuže [48].....	23
Obr. 6 - Pracovní diagram betonářské výztuže při zvýšených teplotách [48].....	24
Obr. 7 - Teplotní prodloužení betonářské výztuže a předpínací výztuže v závislosti na teplotě [42].....	24
Obr. 8 – Nebezpečí explozivního odprýsknutí v závislosti na rozměrech průřezu dle Bulletin D'Information CEB [2].....	27
Obr. 9 - Schématické znázornění chování železobetonového prvku při požáru [1].....	29
Obr. 10 - Růst pevnosti v tlaku malt, obsahujících různé množství disperze PVAC (0, 10, 20 %) uložených na vzduchu s relativní vlhkostí 75 % [4] .....	33
Obr. 11 – Zbytkové pevnosti v tlaku po 28 dnech [22].....	36
Obr. 12 – Pevnosti v tlaku různých druhů malt v závislosti na teplotě [24] .....	37
Obr. 13 – Pevnosti v tlaku různých druhů směsí s lehkým kamenivem a vlákny [27] .....	39
Obr. 14 – Vliv způsobu chlazení na pevnost v tlaku malt s obsahem strusky a pemzy [30] .....	40
Obr. 15 – Produkce energetických produktů v ČR za rok 2012 [45] .....	44
Obr.16 – Oblasti využití energetických produktů v ČR [45] .....	45
Obr. 17 – Normová teplotní křivka [49].....	50
Obr. 18 – Objemové hmotnosti a jejich změny v závislosti na teplotě .....	52
Obr. 19 – Pevnosti v tlaku a jejich změny v závislosti na teplotě .....	52
Obr. 20 – Pevnosti v tahu a jejich změny v závislosti na teplotě .....	53
Obr. 21 – XRD grafický záznam malty s obsahem 10 % mikrosiliky .....	55
Obr. 22 – Průběh DTA derivátogramu vzorku s 10 % popílku.....	58
Obr. 23 – Mikroskopické snímky malt s obsahem 5 % a 10 % popílku .....	59
Obr. 24 – Mikroskopické snímky malt s obsahem 5 % a 10 % strusky .....	60
Obr. 25 – Mikroskopické snímky malt s obsahem 5 % a 10 % mikrosiliky .....	61
Obr. 26 – Mikroskopické snímky referenčních vzorků.....	62

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Zbytkové pevnosti v tlaku v betonu v závislosti na teplotě [20].....	13
Tab. 2 – Přehled změn k nimž dochází v průběhu zahřívání betonu [2][8] .....	14
Tab. 3 – Požadované základní parametry správkových látek [4] .....	31
Tab. 4 – Složení receptur .....	49
Tab. 5 – Identifikace minerálů.....	54
Tab. 6 – Vyhodnocení DTA .....	57

## Seznam použitých zkratk a symbolů

CC	cement concrete – cementový beton
PCC	polymer cement concrete – polymer cementový beton
PPCC	polymer portland cement concrete – polymer-cementový portlandský beton
PIC	polymer impregnated beton – beton impregnovaný polymerem
PC	polymer concrete – polymerní beton
PES	polyester
SI	silikon
PVAC	polyvinylacetát
A	akrylát
MA	metakryláty
XA1	mírně agresivní chemické prostředí určené dle EN 206-1, Tab.2
XRD	X-Ray Diffraction – Rentgenová difrakce
DTA	Diferenční Termická Analýza
REM	Rastrovací elektronový mikroskop