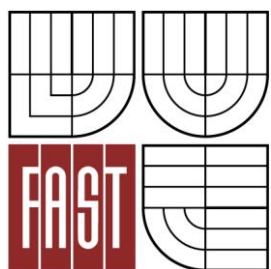




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT
A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPO-
NENTS

VÝVOJ POŽÁRNĚ ODOLNÝCH SPRÁVKOVÝCH MALT S JEMNOZRNNÝM PLNIVEM

THE DEVELOPMENT OF FIRE-RESISTANT REPAIR MORTARS WITH FINE-GRAINED
FILLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ ZÁRUBA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Jiří Záruba
Název	Vývoj požárně odolných správkových malt s jemnozrnným plnivem
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015
V Brně dne 31. 3. 2014	

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

Podklady a literatura

Drochytka, R., Dohnálek, J., Bydžovský, J., Pumpr, V., Dufka, A., Dohnálek, P.: Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III. 1. Brno, Sdružení pro sanace betonových konstrukcí. 2012. 265 p. ISBN 978-80-260-2210-7.

Bisby, L., A.; Chen, J., F.; Li, S., Q.; Stratford, T., J.; Cueva, N.; Crossling, K. Strengthening fire-damaged concrete by confinement with fibre-reinforced polymer wraps, online, Engineering Structures 33, 2011, 3381-3391.

Pan, Z.; Sanjayan, J., G.; Kong, D., L., Y. Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures, online, Construction and Building Materials 36, 2012, 365-372. Concrete Society: Polymers in concrete, The Constructoin Press, 1975.

ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení, 2009.

ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky, 2000.

www.sciencedirect.com

Zásady pro vypracování

S ohledem na dominující pozici železobetonu jako stavebního materiálu skýtá obor sanace železobetonových konstrukcí široký prostor pro výzkum a vývoj nových materiálů. Jednou z možností jsou i jemnozrnné správkové malty odolné vůči extrémním teplotám. Cílem práce je výzkum a vývoj jemnozrnné sanační malty s odolností vůči vysokým teplotám, jež jsou charakteristické při vzniku požáru. V rámci vypracování diplomové práce jsou požadovány následující výstupy:

1. Vyhledání relevantních informací týkajících se jemnozrnných hmot pro sanaci železobetonových konstrukcí s důrazem také na odolnost vůči vysokým teplotám.
2. Studium a zhodnocení vybraných odborných tuzemských i zahraničních publikací zaměřených na již probíhající výzkum v oblasti kompozitních materiálů odolných vůči extrémním teplotním podmínkám.
3. Výběr potenciálně vhodných složek a návrh receptur – pojivo, plnivo, vlákna, polymerní modifikátory, jemnozrnné příměsi.
4. Laboratorní testování parametrů navržených hmot v souladu s platnými normami (objemová hmotnost, pevnost v tlaku a tahu za ohybu, přídržnost, objemové změny v průběhu zrání apod.) včetně teplotního zatížení těles.
5. Diskuze výstupů a vyvození patřičných závěrů s výběrem optimální receptury.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

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

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc. za jeho cenné připomínky a odborné rady při zpracování mé diplomové práce, za trpělivost a ochotu. Dále bych rád poděkoval za odbornou pomoc a rady Ing. Tomáši Melicharovi, Ph.D. a také bych rád poděkoval pracovníkům ústavu THD, jmenovitě Františku Klímovi a Vladimíru Klímovi za pomoc při zkoušení vzorků. V neposlední řadě děkuji svým rodičům, kteří mi svojí podporou umožnili studium na vysoké škole.

Bibliografická citace VŠKP

ZÁRUBA, Jiří. *Vývoj požárně odolných správkových malt s jemnozrnným plnivem*. Brno, 2015. 89 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci s názvem *Vývoj požárně odolných správkových malt s jemnozrnným plnivem* jsem zpracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Bydžovského, CSc., s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 16. ledna 2015

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na požárně odolné správkové malty s jemnozrnným plnivem. Cílem této práce je výzkum a vývoj jemnozrnné správkové malty odolné vůči vysokým teplotám, jež jsou charakteristické při vzniku požáru. Byly využity teoretické poznatky s následně realizovaným laboratorním ověřením. Pozornost byla věnována hmotám na bázi směsného pojiva obsahujícího cement a vysokopecní strusku, resp. vysokoteplotní popílek. Jako rozptýlená výztuž byla použita celulózová vlákna. Posuzovány byly dva druhy kameniv – popílkový agloporit a amfibolit vč. jejich kombinací. Laboratorní testy probíhaly formou stanovení základních materiálových vlastností (objemová hmotnost, pevnosti, soudržnost, rozměrové změny atd.) po expozici při extrémních teplotách. Podstatnou částí výzkumu bylo také studium rozdílných podmínek chlazení – pozvolné a dále rychlé (ve vodě a na vzduchu). Vybrané receptury byly namáhány teplotou až do 1200 °C. V závěru práce je vybráno několik receptur, které byly na základě výsledků a zjištění shledány jako optimální pro navazující výzkum.

Klíčová slova

správkové hmoty, příměsi, lehké kamenivo, alternativní suroviny, směsné pojivo, rozptýlená výztuž, polymerní modifikátor, fyzikálně-mechanické parametry, teplotní zatížení, pozvolné a šokové chlazení

Abstract

The diploma thesis is focused on fire-resistant repair mortar with fine-grained filler. The aim of this work is the research and development of fine-grained Mortars resistant to high temperatures, which are characteristic at the beginning of the fire. The theoretical knowledge with subsequently realized laboratory verification was used. Attention was paid to the masses based on the mixed binder comprising cement and blast furnace slag, respectively. high-temperature ash. Cellulose fibres were used as the dispersed reinforcement. Two kinds of aggregate were assessed - fly ash agloporit and amphibolite incl. combinations thereof. Laboratory tests were carried out via determination of basic material properties (density, strength, consistency, dimensional changes etc.) after exposure to extreme temperatures. A substantial part of the research was also study

of different cooling conditions - slow and fast (water and air). Selected formulations were subjected to temperatures up to 1200 ° C. In the conclusion is selected several recipes that have been found to be optimal for continuing research on the basis of the results and findings.

Keywords

repair mortars, addition agent, lightweight aggregate, alternative raw materials, blended binder, dispersed reinforcement, polymer modifier, physico-mechanical parameters, thermal load, slow and fast cooling

Obsah

Úvod	11
1 Cíl práce	13
A) Teoretická část	14
2 Správkové hmoty	14
2.1 Požadavky na správkové hmoty	16
3 Požární odolnost stavebních konstrukcí	18
3.1 Sanace se zvýšenou odolností vůči vysokým teplotám	20
3.2 Probíhající děje při požáru v cementových kompozitech.....	21
4 Výzkum v oblasti kompozitních materiálů odolných vůči vysokým teplotám	24
4.1 Působení požáru a chlazení na vlastnosti malty	24
4.2 Polymer-cementový kompozit s proti požární odolností.....	26
4.3 Stanovení charakteristik po teplotní expozici s využitím lehkého kameniva...	30
4.4 Vývoj geopolymerní malty s obsahem 70 % kalcinované rudy - hlušiny a 30 % granulované vysokopecní strusky	31
B) Experimentální část	33
5 Metodika práce	33
6 Použité zkušební metody	36
6.1 Stanovení zrnitosti kameniva- síťový rozbor	36
6.2 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty	36
6.3 Pevnost v tahu ohybem.....	37
6.4 Pevnost v tlaku.....	38
6.5 Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou	38

7	Výsledky a zjištění	39
7.1	Výběr vhodných surovin	39
7.1.1	Kamenivo	39
	Amfibolit.....	39
	Popílkový agloporit.....	39
7.1.2	Pojivo	40
7.1.3	Příměsi.....	40
	Vysokopecní struska	40
	Vysokoteplotní popílek.....	41
	Mikrosilika.....	41
7.1.4	Voda	41
7.1.5	Polymerní modifikátor	41
7.1.6	Rozptýlená výztuž	42
7.2	Sestavení receptur	42
7.2.1	Vliv vláken	42
7.2.2	Vliv příměsí.....	43
7.2.3	Vliv kameniva	44
7.2.4	Receptury pro následující etapy	45
7.3	Návrh teplotního zatěžování a příprava zkušebních těles	47
7.4	Sledování objemových změn v průběhu zrání.....	49
7.5	Tepelná expozice malt	51
7.6	Testování základních parametrů malt.....	58
7.6.1	Změny rozměrů	58
7.6.2	Objemová hmotnost	62
7.6.3	Pevnost v tlaku	68

7.6.4	Pevnost v tahu ohybem	73
7.6.5	Soudržnost s podkladem	77
8	Diskuse výsledků	79
8.1	Výběr kameniva.....	79
8.2	Vliv složení pojiva.....	79
8.3	Vliv chlazení těles	81
9	Závěr	82
10	Seznam použitých zdrojů	84

Úvod

Sanace betonu a železobetonu je vzhledem k množství stavebních konstrukcí z těchto materiálů stále se rozvíjející částí stavebního odvětví. Úkolem sanace je ochrana a oprava stavebních konstrukcí a s tím související doba životnosti staveb. Sanace je prováděna zejména u konstrukcí, ve kterých došlo ke snížení únosnosti či poruchám a závadám nebo nějaké jiné neočekávané situaci, která ovlivňuje životnost staveb.

Faktorů, které mohou ovlivnit životnost staveb je mnoho. Nejčastěji vyskytované příčiny, které mohou zkrátit životnost, jsou např. změna účelu konstrukce, nadměrné zatížení, nesprávné provedení při výstavbě, nedostatečná údržba a požár. Vznik požáru může být zapříčiněn několika okolnostmi – neopatrnou manipulací s hořlavými látkami, závadou na elektroinstalaci, unikajícím plynem, neopatrností lidí při práci nebo dopravní nehodou. Mezi budovy s vyšší protipožární odolností by měly patřit zejména veřejné budovy s vyšším pohybem lidí, výškové budovy, nemocnice, kina. Z dopravních staveb se jedná zejména tunely a mostní konstrukce. Požárem a vznikajícími kouřovými spalinami je ovlivněna nejen samotná budova, ale také lidské životy. Vhodným návrhem betonu či sanačně požárně odolné malty lze ovlivnit, především prodloužit, únosnost konstrukce, a tím pádem zvýšit nutnou dobu pro evakuaci jak osob, tak zvířat. Další výhodou je získání času pro odstranění nebezpečných materiálů, které mohou zapříčinit např. explozi. Vyšší odolnost vůči vysokým teplotám lze dosáhnout použitím sanační hmoty vhodného složení.

Průzkumem trhu bylo zjištěno, že v ČR není mnoho výrobců správkových malt odolných proti vysokým teplotám. Tudíž trh v ČR skýtá značný prostor pro výzkum a vývoj těchto hmot s jejich následným využitím pro dodatečné zvýšení odolnosti vůči šokovému působení extrémních teplot. S ohledem na životní prostředí je zajímavá možnost zakomponování alternativních surovin, jako jsou druhotné suroviny či vedlejší produkty průmyslových výrob. Využití alternativních surovin může mít pozitivní vliv jak na vlastnosti správkové hmoty, tak i na cenu, která je mnohdy rozhodujícím faktorem. Substituce plniva i pojiva alternativními surovinami většinou snižuje cenu správkové hmoty a může mít i kladný vliv na výsledné fyzikálně mechanické vlastnosti

správkové hmoty včetně zvýšení odolnosti proti požáru. Spotřebou nejrozumnějších druhů alternativních surovin vnímáme pozitivní vliv i v ohledu na životní prostředí, kde by se jinak tyto nezužitkované suroviny staly odpadem.

1 Cíl práce

Cílem diplomové práce je výzkum a vývoj jemnozrnné správkové malty odolné vůči vysokým teplotám, jež jsou charakteristické při vzniku požáru. S ohledem na rozsah řešení je diplomová práce rozdělena do několika dílčích částí.

V první řadě bude záměrem aktualizace poznatků týkajících se oblasti požární odolnosti sanačních malt a probíhajících změn za vzniku požáru v železobetonu. Kromě teplotní odolnosti sanačních malt bude třeba se také soustředit na jejich základní fyzikálně-mechanické, chemické a trvanlivostní parametry, které jsou podstatné při použití těchto hmot v konstrukcích. Podstatné je také studium výzkumu a vývoje jiných autorů v oblasti kompozitních materiálů odolných vůči extrémnímu teplotnímu zatížení.

Druhým dílčím cílem bude laboratorní ověření všech podstatných aspektů nově navržených a vyvíjených hmot. Zde bude třeba klást důraz na optimální složení receptur, zejména stanovení vhodného vodního součinitele a s tím související zpracovatelnost, vhodného poměru mezi složkami pojiva a plniva, testování příměsí, výběr vláken a vhodného kameniva. Na navržených maltách budou zjišťovány fyzikálně mechanické vlastnosti nejprve při laboratorních podmínkách a dále pak při teplotním zatížení vysokými teplotami s různými průběhy chlazení těles simulující reálné podmínky. Dosažené výsledky budou porovnávány s požadavky na sanační malty dle platných technických norem.

Práce si rovněž klade za cíl podrobné zhodnocení zjištěných údajů, s čímž souvisí výběr optimálních receptur navržených správkových malt. K tomuto bude využito výstupů testů základních fyzikálně-mechanických charakteristik, tj. pevnosti v tlaku a tahu za ohybu, objemové hmotnosti ztvrdlé malty, objemové změny v průběhu zrání i po teplotním zatížení a přídržnost. V neposlední řadě je cílem práce vyvození patřičných závěrů obsahujících doporučení pro navazující výzkum.

A) Teoretická část

2 Správkové hmoty

S ohledem na dominující pozici železobetonu jako stavebního materiálu skýtá obor sanace železobetonových konstrukcí široký prostor pro výzkum a vývoj nových materiálů. Jednou z možností jsou i jemnozrnné správkové malty odolné vůči vysokým teplotám. Úkolem správkových malt je reprofilovat betonové konstrukční prvky do původního tvaru. Tyto malty slouží pro ochranu a opravu betonových konstrukčních prvků. S tímto souvisí obnovení trvanlivosti, resp. prodloužení životnosti konstrukce a uvedení do původního stavu nebo obnovení či zvětšení tloušťky krycí vrstvy nad výztuží. Případně je lze využít pro statické zesílené konstrukce, avšak je potřeba v projektu sanace upozornit a zároveň navrhnout opatření, která by zajistila statické spolupůsobení sanované betonové konstrukce a navržených správkových hmot. [1]

Základním předpokladem pro návrh sanace je provedení stavebně technického průzkumu. Cílem tohoto průzkumu je identifikace kvality betonu a jeho vlastností. Aby sanace byla úspěšná a zdařilá, je důležité znát účel sanace, podmínky provozu, prostředí konstrukce a její využití. Pro diagnostiku železobetonových konstrukcí nám slouží několik druhů průzkumů, konkrétně se jedná o předběžný, podrobný a doplňkový stavebně technický průzkum. Těmito průzkumy se zjišťují charakteristiky sanované konstrukce. Záměrem stavebně technického průzkumu je tedy zjištění skutečného stavu konstrukce, jako je identifikace závad na konstrukci včetně poruch a jejich příčin. Např. se jedná o mrazuvzdornost betonu, odolnost proti CHRL, stav koroze výztuže a rozsah povrchových vad. Zkoušení může probíhat několika způsoby. Prvním způsobem je zkoušení přímo na místě v (in situ) např. pevnost v tahu povrchových vrstev betonu, či nedestruktivní metody zkoušení, zejména tvrdoměrné metody. Dalším způsobem je zkoušení odebraných vzorků v laboratoři. Nejčastěji ke zjištění a určení vad na konstrukci slouží tělesa získaná pomocí jádrových vývrtů, na kterých se provádí požadované laboratorní zkoušky zejm. pevnost v tlaku, pevnost v tahu, mrazuvzdornost, odolnost proti působení vody a CHRL či modul pružnosti betonu a podobně.[14]

Na základě dosažených výsledků lze posoudit stav konstrukce a navrhnout opatření potřebná pro sanaci. Při návrhu opatření potřebných pro sanaci je potřeba zohlednit několik faktorů. Pro investory jsou hlavní náklady na sanaci. Pro vedoucího technologických prací je důležitý návrh správkových malt a způsob provádění sanace. Dále je klíčová vzájemná kompatibilita materiálů a technologická náročnost provádění. V neposlední řadě je podstatným faktorem spolupůsobení podkladu s novým správkovým materiálem a jejich vzájemná soudržnost. Pro kvalitní provedení sanace je potřeba důkladně očistit podklad od nečistot a nesoudržných částí konstrukce. Dobrou přídržnost je potřeba zajistit správné vlhkosti podkladu. Při vysoké vlhkosti podkladu může dojít k nízké soudržnosti a špatnému spolupůsobení stávající konstrukce a nové správkové hmoty. Naopak při vysušeném podkladu může dojít k odsávání vody ze správkové malty a tím nastane ovlivnění vlastností správkové hmoty.



Obr. 1 : Nanášení správkové hmoty stříkáním [7]

Důležitým faktorem je skladování a užívání materiálu dle pokynů výrobce. Nejčastěji v originálním obalu od výrobce a v suchém prostředí při teplotě od 5 do 20 °C.

Správkové hmoty se člení do skupin podle složení:

- cementové malty a betony (CC)
- polymercementové malty a betony (PCC) – cementové malty a betony modifikované polymerními přísadami (např. akryláty, polyvinylacetáty a jejich kopolymery)
- polymer malty a polymerbetony (PC) – malty a betony, jejichž pojivem jsou výhradně polymerní pryskyřice (např. epoxidy, PUR, PES, SI)
- injektážní hmoty a zálivky- nejběžněji to jsou malty na bázi portlandského cementu, pro speciální aplikace jsou to epoxidové pryskyřice

2.1 Požadavky na správkové hmoty

Správkové hmoty slouží především pro obnovu trvanlivosti betonových konstrukcí a zpětné uvedení do původního stavu těchto konstrukcí i po vzhledové stránce. Jedná se o komplexní proces zahrnující vliv prostředí a očekávané užívání.

Mezi materiálové vlastnosti patří:

- požadavky na únosnost
- požadavky uživatele na funkci
- technologická náročnost při provádění
- podmínky provozu prostředí

Z těchto požadavků je zvolen materiál s optimálním poměrem mezi náklady, funkcí a prováděním. Správkové hmoty musí být kompatibilní s podkladem. Výběr správkových hmot je důležitý pro spolupůsobení a soudržnost s podkladem. Důležitým faktorem jsou objemové změny správkových hmot vzhledem k podkladu. Objemové změny mohou být příčinou vzniku trhlin, či snížení soudržnosti mezi podkladem a správkovou hmotou. Soudržnost (přidrženost) je velice důležitá vlastnost pro správkové hmoty. Zlep-

šení a zvýšení přídržnosti můžeme ovlivnit pomocí přísad přidaných do správkových hmot či aplikací adhezního můstku.[1][14]

Správkové hmoty musí splňovat tyto požadavky:

- vysokou soudržnost s podkladem
- dobrou vodotěsnost, resp. malou nasákavost
- mrazuvzdornost minimálně na úrovni T100, případně větší podle konkrétních podmínek expozice
- minimální objemové změny v důsledku změn vlhkost a teploty
- omezený vznik smršťovacích trhlin
- co nejnížší modul pružnosti, který by měl být nižší než je modul pružnosti podkladního betonu
- pevnost v tlaku, resp. v tahu za ohybu na shodné nebo mírně vyšší úrovni než podkladní beton
- odolnost vůči agresivním médiím podle konkrétních podmínek expozice

Tab. 1 : Požadované základní parametry správkových hmot dle ČSN EN 1504-3 [6]

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)	$\geq 10 \text{ MPa}$	$\geq 15 \text{ MPa}$	$\geq 25 \text{ MPa}$	$\geq 45 \text{ MPa}$
Obsah chloridových iontů (ČSN EN 1015-17 nebo ČSN EN 14629)	$\leq 0,05 \%$	$\leq 0,05 \%$	$\leq 0,05 \%$	$\leq 0,05 \%$
Soudržnost (ČSN EN 1542)	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
Vázané smršťování/rozpínání^{1,2} - soudržnost po zkoušce (ČSN EN 12617-4)	Bez požadavků	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
Modul pružnosti (ČSN EN 13412 nebo ČSN EN ISO 6784)	Bez požadavků	Bez požadavků	$\geq 15 \text{ GPa}$	$\geq 20 \text{ GPa}$

Parametr	Správkové hmoty bez statické funkce		Správkové hmoty se statickou funkcí	
	Třída R1	Třída R2	Třída R3	Třída R4
Odolnost proti karbonataci (ČSN EN 13295)	Bez požadavků	Bez požadavků	$dk \leq \text{kontrolní beton (MC(0,45))}$	$dk \leq \text{kontrolní beton (MC(0,45))}$
Tepelná slučitelnost^{1,2}				
zmrazování a tání - soudržnost po 50 cyklech	Vizuální prohlídka	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
náporové skrápění - soudržnost po 30 cyklech	Vizuální prohlídka	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$
cyklování za sucha - soudržnost po 30 cyklech (ČSN 13687-1 až 5)	Vizuální prohlídka	$\geq 0,8 \text{ MPa}$	$\geq 1,5 \text{ MPa}$	$\geq 2,0 \text{ MPa}$

Pozn.:

- 1 Uvedená hodnota je hodnotou průměrnou a jednotlivé hodnoty nesmí být menší než 75 % uvedeného požadavku.
- 2 Maximální přípustná průměrná šířka trhliny je $\leq 0,05 \text{ mm}$, bez delaminace.

Jak je patrné z výše uvedené tabulky (viz *Tab. 1*) pro vývoj sanační malty se statickou funkcí je třeba vyvinout kompozit s minimální pevností v tlaku $\geq 25 \text{ MPa}$, soudržností $\geq 1,5 \text{ MPa}$ a modulem pružnosti $\geq 15 \text{ GPa}$.

3 Požární odolnost stavebních konstrukcí

Požární odolnost stavebních konstrukcí je z pohledu bezpečnosti při vzniku požáru důležitým faktorem. Požární bezpečnost stavebního objektu je charakterizována stupněm požární bezpečnosti jednotlivých požárních úseků, na které je stavební objekt rozdělen. Stupeň požární bezpečnosti vyjadřuje souhrn technických požadavků na stavební konstrukce. Pro posuzované konstrukce je zavazující splnit charakteristické vlastnosti požární odolnosti, které se označují písmeny a dobou v minutách. Konkrétně se jedná o následující písemné označení – R (nosnost konstrukce), E (celistvost konstrukce), I (tepelná izolace konstrukce), W (hustota tepelného toku z povrchu konstrukce) a S (kouřotěsnost konstrukce). V případě označení pomocí doby v minutách se jedná se o čas, kdy musí daná konstrukce odolávat vzniklému požáru, ani

by došlo k omezení její funkce či stability. Zároveň je určen i druh konstrukce DP1, DP2, DP3 podle použitých hmot A1, A2, B, C, D, E, F dle ČSN EN 13501-1. Požární odolnost stavebního objektu platí a musí být zajištěna po celou dobu životnosti konstrukce. [2]

V tabulce uvedené níže (viz *Tab. 2*), lze zaregistrovat tři druhy nechráněného konstrukčního materiálu a jejich míru odolnosti při požáru.

Tab. 2 : Shrnutí vlastností nechráněných konstrukčních materiálů při požáru[28]

nechráněný konstrukční materiál	požární odolnost	hořlavost	přispívání k požární- mu zatížení	rychlost šíření tepla v průřezu	zabudovaná (přirozená) požární ochrana	možnost opravy po požá- ru	ochrana pro evakuaci a požární zásah
dřevo	nízká	vysoká	vysoké	velmi nízká	velmi nízká	nulová	nízká
ocel	velmi nízká	nulová	nulové	velmi vysoká	nízká	nízká	nízká
beton	vysoká	nulová	nulové	nízká	vysoká	vysoká	vysoká

V následující tabulce (viz *Tab. 3*) jsou shrnutá hlavní kritéria požární ochrany na konstrukce, která jsou navržena dle Eurokódu 2. Jedná se o písmena R, E a I. V další části tabulky lze zpozorovat mezní stav při požáru a kritéria, která musí být splněna, aby daná konstrukce splnila požadavky pro stabilitu konstrukce a případnou evakuaci. Číselné hodnoty značí normovou požární odolnost v minutách. Konkrétně se jedná o mezní stavy v následujících intervalech – 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 a 360 minut.[27]

Tab. 3 : Tři hlavní kritéria požární odolnosti [3]

Označení	Mezní stav při požáru	Kritérium
R (Résistance)	Mezní únosnosti	Únosnost konstrukce musí být zaručena po předepsanou dobu požáru. Doba, po kterou je zachována nosná funkce prvku při požáru, definovaná jeho mechanickou únosností.
	Konstrukce by si měla zachovat únosnost	
E (Etanchéité)	Mez celistvosti	Dostatečná celistvost předchází proniknutí plamenů a žhavých plynů na odvrácenou stranu. Doba, po kterou je kromě únosnosti zachována požárně dělicí funkce prvku, definovaná těsností jeho spojů pro plameny a plyny.
	Konstrukce by měla ochránit lidi a zboží před plameny, škodlivým kouřem a žhavými plyny	
I (Isolation)	Mez izolace	Dostatečná izolace vede k omezení nárůstu teploty na odvrácené straně. Doba, po kterou je kromě únosnosti a celistvosti zachována požárně izolační schopnost prvku, definována dodržením přípustného nárůstu teploty na straně nevystavené požáru.
	Konstrukce by měla ochránit lidi a zboží před žářem	

3.1 Sanace se zvýšenou odolností vůči vysokým teplotám

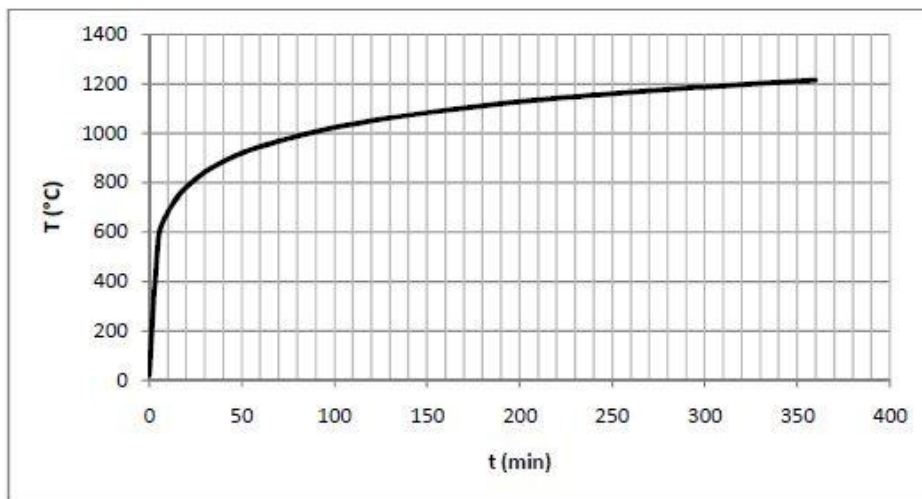
Správkové malty s odolností vůči vysokým teplotám, musí splňovat požadavky dle normy ČSN EN 13501-1+A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Požárně odolné sanace spadají do třídy reakce na oheň A1. Tato třída vyjadřuje stav, že výrobky jsou nehořlavé a tudíž nebudou přispívat k požáru v žádném jeho stádiu. Třídy hořlavosti se dělí do pěti kategorií. [4]

- Stupeň A - nehořlavé stavební hmoty
- Stupeň B - nesnadno hořlavé stavební hmoty
- Stupeň C1 - těžce hořlavé stavební hmoty
- Stupeň C2 - středně hořlavé stavební hmoty
- Stupeň C3 - lehce hořlavé stavební hmoty

Norma ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky specifikuje zkoušení a zkoušky požární odolnosti, které souvisí s výše uvedeným rozdělením. V této normě je podrobně popsáno, jakým způsobem má být prováděno zkoušení vzorků a průběh zatěžovací teploty, který je dán normovou křivkou a vztahem:

$$T=345 \cdot \log_{10}(8t+1)+20$$

Jak je patrné z níže uvedeného grafu (viz Obr. 2) velmi strmý nárůst lze zpozorovat v teplotním intervalu 0 až 600 °C, cca během 5 minut. Dále do 25 minut od začátku tepelné expozice je dosaženo teploty 800 °C, přičemž během zbývajících času – do 6 hod od počátku tepelného zatěžování je dosaženo teploty cca 1200 °C.



Obr. 2 : Normová teplotní křivka [5]

3.2 Probíhající děje při požáru v cementových kompozitech

Typickým a nejrozšířenějším stavebním materiálem, který se řadí do skupiny cementových kompozitů, je beton. Tento materiál je nehořlavý, ovšem za zvyšování teploty při vzniku požáru dochází ke snížení pevností jak betonu, tak i zpravidla obsažené výztuže, která přenáší tahové zatížení. Požár ovlivňuje fyzikální i chemické vlastnosti betonu, resp. železobetonu. Tyto změny jsou ovlivněny několika faktory. Mezi tyto faktory řadíme jednak kvalitu materiálu, průběh a délku teplotní zátěže a také způsob přestupu tepla.

Co se týče samotného jevu, již při 100 °C se začne odpařovat fyzikálně vázaná voda a vlhkost v pórech. V tomto momentu může dojít k navýšení pevnosti. Při 200 °C dochází ke ztrátě fyzikálně vázané vody. Díky této ztrátě dochází ke zvýšení vnitřního tlaku. Volná voda není přítomna při 374 °C. Při 400 °C nastává rozklad portlanditu $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. K ukončení rozkladu portlanditu dochází při teplotě cca 550 °C. Další mezní teplotou je 573 °C, kdy dochází ke krystalické přeměně křemene v kamenivu z β na α modifikaci. Při této teplotě dochází k velkým objemovým

změnám, které způsobují snížení únosnosti konstrukce a vznikají trhlinky. Může dojít i k oddělení výztuže od betonu a výztuž může být vystavena přímému zatížení požárem. Důsledkem přímého účinkování požáru na výztuž, může dojít k přetvoření ocelové výztuže a následné ztrátě únosnosti. S vyšší teplotou klesá pevnost oceli, ale zvyšují se plastické vlastnosti. Při 600 °C nastává rozklad C-S-H gelů za tvorby β -C₂S. Při cca 700 °C dochází k rozkladu $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Při 800 °C se struktura betonu sline a vzniká keramická vazba. K celkovému rozkladu betonu dochází při teplotách od cca 1200 °C. [6]

Kombinace betonu a ocelové výztuže, je kromě zajištění požadované únosnosti z hlediska pevnosti v tahu za ohybu výhodná jak z pohledu alkalické pasivace výztuže, tak i zvýšením doby, po kterou je schopná ocelová výztuž zachovávat svou únosnost a mechanické vlastnosti. Beton chrání výztuž před přímým účinkem požáru a zabraňuje přímému teplotnímu zatížení výztuže. Negativní vlastností spolupůsobení oceli a betonu je různá teplotní roztažnost při teplotním zatížení. Ta má za následek negativní ovlivnění mechanických vlastností betonu, zejména vzniku trhlin a poklesu pevnosti.

Při teplotním zatížení vzniká vlivem rozdílných teplot pnutí mezi povrchovými a vnitřními částmi kompozitního materiálu (v tomto případě na bázi cementové matrice). Tento stav může být doprovázen vznikem trhlinek a prasklin, které mají za následek snížení pevností. Vlivem trhlinek se zvyšuje pórovitost stavebních materiálů, která vede ke snížení odolnosti proti působení vody nebo vodných roztoků solí a zvyšuje se tím riziko vzniku koroze výztuže. Pro omezení vzniku trhlin je vhodné použít vlákna. Užití vláken má příznivý dopad pro zamezení vzniku smršťovacích trhlinek v průběhu zrání kompozitních materiálů. Příznivý dopad mají i při teplotním zatížení. V okamžiku teplotního zatížení vyhořívají a tím vytváří novou kapilární strukturu, díky níž vzniká prostor pro zmírnění tlaku vodní páry. Tlak může způsobovat explosivní odprýskávání povrchových vrstev. Tento tlak vzniklý uvnitř správkové hmoty může zapříčinit odprýskávání povrchových vrstev a obnažení výztuže. Uvedený jev má negativní dopad na únosnost konstrukce. Zejména z důvodu, že při požáru a odhalené výztuži může dojít k přímému styku požáru s výztuží

a následně k přímému styku výztuže se vzdušnou vlhkostí a povětrnostními vlivy. Tyto faktory mohou zapříčinit povrchovou korozi výztuže do doby, než bude konstrukce uvedena do původního stavu.



Obr. 3 : Požár mostu v Přerově [11]



Obr. 4 : Požár elektroinstalace na mostě v Přerově [11]

4 Výzkum v oblasti kompozitních materiálů odolných vůči vysokým teplotám

V této části jsou zpracovány aktuální poznatky ve světě a v ČR, které se týkají výzkumu v oblasti kompozitních materiálů s vyšší odolností proti působení extrémních teplot.

4.1 Působení požáru a chlazení na vlastnosti malty

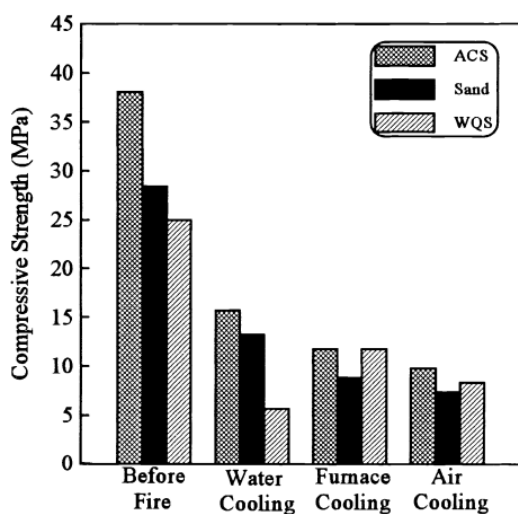
Tento výzkum se zabýval vlivem různých typů chlazení, konkrétně se jednalo o následující chladicí metody - voda (W-cooled), vzduch (A-Cooled), pec (F-cooled). Celkem byly namíchány tři maltové směsi - s pískem, ACS a WQS v poměru pojiva ku plnivu 1:3. V tabulce *Tab. 4* je zobrazeno procentuální zastoupení různých frakcí plniva.

Tab. 4 : Složení jednotlivých frakcí písku, strusky ACS a strusky WQS [19]

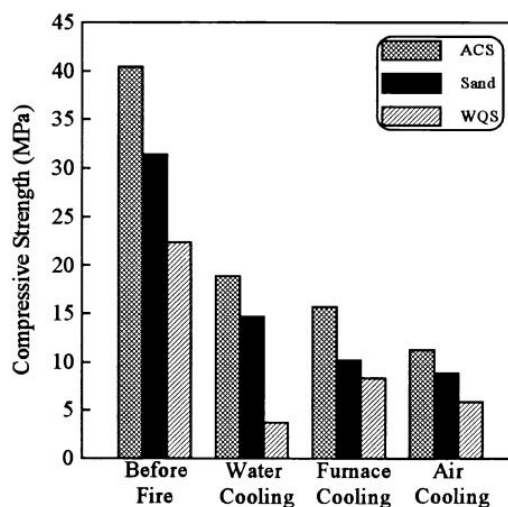
Grading of sand and slags used			
Sieve size (mm)	% Passing		
	Sand	ACS	WQS
5.00	100	100	100
2.50	92.0	93.5	91.5
1.25	70.5	80.7	63.8
0.60	50.0	61.2	27.3
0.30	20.0	38.0	7.30
0.15	10.0	15.0	2.60

Byly namíchány tři záměsi o různých vodních součinitelích $w/c = 0,4; 0,5; 0,6$. Složení jednotlivých směsí: pojivo (OPC-portlandský cement) ku plnivu (písek, ACS a WQS) v poměru 1:3. Dávkování OPC v množství 400 kg/m^3 . Testování bylo prováděno při teplotním zatížení 600°C . S teplotním nárůstem deset až dvacet stupňů za minutu a výdrží po dobu dvou hodin.

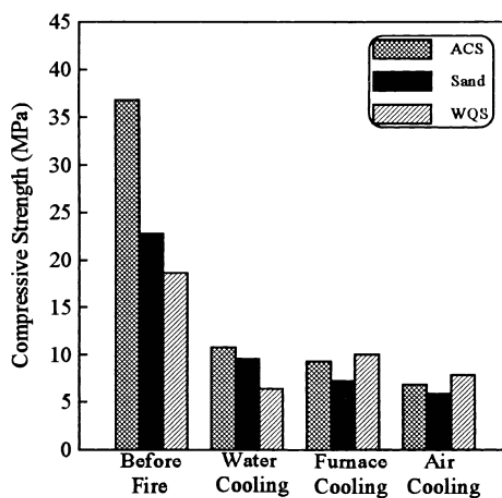
V následující sadě obrázků *Obr. 5* lze pozorovat uvedené tři typy maltových směsí v porovnání chlazení, při jednotlivých vodních součinitelích.



Compressive strength vs. cooling method for mortars with 0.4 w/c



Compressive strength vs. cooling method for mortars with 0.5 w/c



Compressive strength vs. cooling method for mortars with 0.6 w/c

Obr. 5 : Pevnost v tlaku a chladicí metody s různým vodním součinitelem (zleva $w/c=0,4$; $w/c=0,5$; $w/c=0,6$) [19]

Z uvedených experimentů je patrný vliv chlazení a vodního součinitele na maltových směsích. Všechny maltové směsi (bez ohledu na způsob chlazení) se vyznačovaly výrazným poklesem pevnosti v tlaku. Nejviditelnější propad pevnosti je u směsí s vodním součinitelem w/c 0,6. Snížení pevnosti u směsi s pískem bylo v průměru o 55 %, u ACS malty 60 % a WQS 75 %. Pozoruhodný efekt nastal mezi vodními součiniteli w/c 0,4 a w/c 0,5. V porovnání w/c 0,4 a w/c 0,5 došlo k nárůstu pevností v tlaku u směsi s pískem a ACS při vodním součiniteli w/c 0,5. U směsi WQS naopak došlo

k poklesu pevnosti v tlaku při všech typech chlazení s vodním součinitelem w/c 0,5 oproti w/c 0,4. Při vodním součiniteli w/c 0,6 došlo k poklesu pevností v tlaku u směsí s plnivem pískem a ACS ve srovnání s vodními součiniteli w/c 0,4 a w/c 0,5. U směsí s plnivem WQS došlo k mírnému nárůstu pevnosti v tlaku při vodním součiniteli w/c 0,6 oproti w/c 0,5. Pevnost v tlaku u malty je výrazně ovlivněna způsobem chlazení. U chlazení vzduchem došlo u směsí k výraznějšímu poklesu pevnosti v tlaku, než u směsí, které byly chlazeny v peci či ve vodě. U chlazení vodou nedocházelo ke vzniku trhlin v takové míře, jako u chlazení na vzduchu a v peci.

4.2 Polymer-cementový kompozit s proti požární odolností

V experimentu publikovaném [18] bylo využito několika složek. Aby se minimalizovalo využití cementu, byla přidána vysokopecní struska, porcelán a polypropylenová vlákna v poměru plniva:pojivu 2:1. Podrobné složení je uvedeno v tabulce *Tab. 5* níže.

Tab. 5 : Složení malt [18]

Mixture proportions.

Type	Fibre (V _f , %)	Cement (%)	Porcelain (%)	Blast furnace slag (%)	Cement:Sand	Perlite (V _l , %)	SF ^a (%)	Polymer (%)	Anti-forming agent (%)	SRA ^b (%)	W/C
F1COP0	0.1	0	0	100	1:2	30%	10	2 ^c	10 ^d	0.1 ^e	53
F1COP15			15								
F1COP30			30								
F1C50P0		50	0	50							40
F1C50P15			15								
F1C50P30			30								
F1C100P0		100	0	0							39
F1C100P15			15								
F1C100P30			30								
F15COP0	0.15	0	0	100							53
F15COP15			15								
F15COP30			30								
F15C50P0		50	0	50							40
F15C50P15			15								
F15C50P30			30								
F15C100P0		100	0	0							39
F15C100P15			15								
F15C100P30			30								
F2COP0	0.2	0	0	100							53
F2COP15			15								
F2COP30			30								
F2C50P0		50	0	50							40
F2C50P15			15								
F2C50P30			30								
F2C100P0		100	0	0							39
F2C100P15			15								
F2C100P30			30								

^a Silica fume.

^b Shrinkage reducing agent.

^c 2 wt.% of cement + quartz sand.

^d 10 wt.% of polymer.

^e 0.1 wt.% of total weight.

Pro pevnost v tlaku byla vytvořena tělesa o rozměrech 50x50x50 mm. Testování proběhlo v souladu s normou ASTM C109. Testování probíhalo po 7, 14 a 28 dnech.

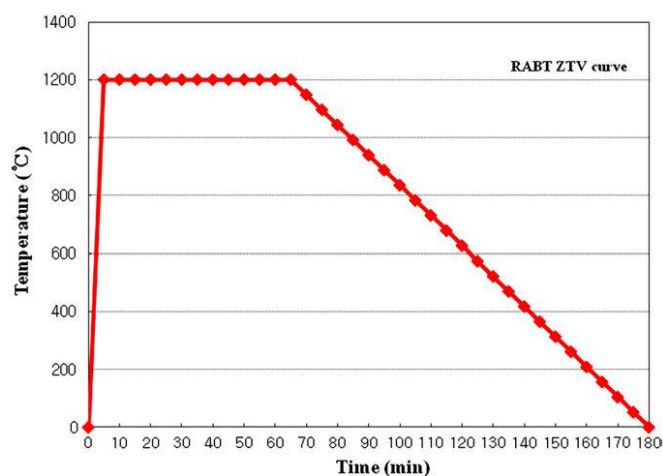
Následující tabulka *Tab. 6* uvádí pevnosti v tlaku po 7, 14 a 28 dnech u každé zá-
měsi.

Tab. 6 : Pevnosti po 7, 14 a 28 dnech [18]

Compressive strength test results.

Mixture type	Compressive strength (MPa)		
	7 days	14 days	28 days
F1C0P0	48.5	50.9	53.5
F1C0P15	49.0	52.2	56.8
F1C0P30	49.6	52.4	57.4
F1C50P0	31.0	33.8	34.4
F1C50P15	29.7	34.1	35.9
F1C50P30	33.0	36.0	37.2
F1C100P0	34.7	36.3	43.4
F1C100P15	41.5	46.1	49.5
F1C100P30	43.1	47.6	50.5
F15C0P0	35.4	42.7	43.6
F15C0P15	36.6	43.4	45.5
F15C0P30	38.1	44.1	45.2
F15C50P0	28.3	29.3	31.4
F15C50P15	29.3	30.7	32.1
F15C50P30	30.3	30.7	32.6
F15C100P0	36.6	41.6	43.8
F15C100P15	37.3	44.7	46.3
F15C100P30	37.9	46.7	50.6
F2C0P0	34.5	36.2	40.3
F2C0P15	39.4	41.2	43.0
F2C0P30	41.8	44.3	46.0
F2C50P0	32.5	33.1	36.7
F2C50P15	32.7	33.9	37.3
F2C50P30	33.6	35.1	39.5
F2C100P0	36.3	41.7	48.9
F2C100P15	38.2	44.3	50.9
F2C100P30	39.5	45.1	52.1

Po 28 dnech byla tělesa teplotně zatížena s gradientem 240 °C/min až na 1200 °C s výdrží 60 min. Teplotní zatížení bylo řízeno podle německé tunelové křivky RA-BT/ZTV, která se používá pro požární ochranu zejména u tunelových konstrukcí. Po této době došlo k řízenému ochlazování 10,4 °C/min. Test probíhal 180 min.



Obr. 6 : Teplotní zatěžování dle křivky RABT ZTV [18]

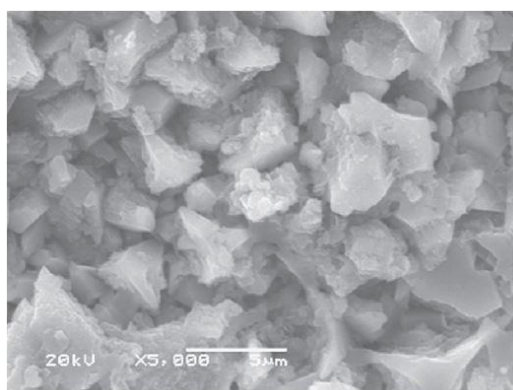
V následující tabulce (viz Tab. 7) jsou uvedeny zbytkové pevnosti po teplotním zatížení.

Tab. 7 : Zbytkové pevnosti po teplotním zatížení na 1200 °C [18]

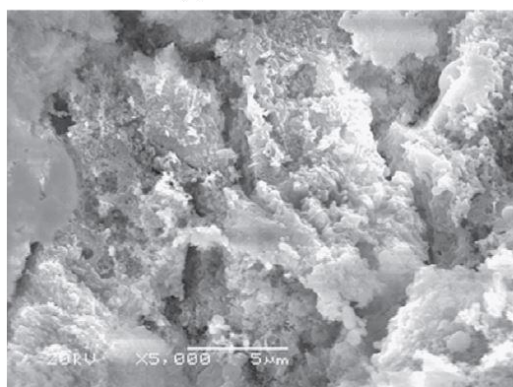
Residual compressive strength after the fire test.

Mixture type	Residual compressive strength (MPa)	Residual ratio (%)
F1C0P0	7.1	13.2
F1C0P15	11.9	20.9
F1C0P30	Explosive spalling	–
F1C50P0	5.2	15.0
F1C50P15	6.5	18.2
F1C50P30	7.5	20.3
F1C100P0	8.5	19.7
F1C100P15	20.9	42.3
F1C100P30	Explosive spalling	–
F15C0P0	8.6	19.7
F15C0P15	9.7	21.8
F15C0P30	Explosive spalling	–
F15C50P0	3.5	11.3
F15C50P15	4.2	12.9
F15C50P30	4.7	14.4
F15C100P0	6.4	14.6
F15C100P15	9.9	22.2
F15C100P30	12.8	25.2
F2C0P0	2.5	6.2
F2C0P15	3.2	7.5
F2C0P30	4.1	8.8
F2C50P0	4.2	11.3
F2C50P15	4.9	13.2
F2C50P30	3.0	7.6
F2C100P0	9.4	19.3
F2C100P15	12.9	25.3
F2C100P30	16.3	31.2

V následujícím obrázku Obr. 7 je patrný názorný rozdíl mikrostruktury u směsí s použitím porcelánu (konkrétně 15 %) a bez použití porcelánu po teplotním zatížení. Na obrázku po teplotním zatížení směsí bez porcelánu je vidět znik pórů a prasklin oproti směsi s porcelánem, která tvoří relativně hustou strukturu. Z chemických analýz vyplývá, že u směsí bez porcelánu po teplotním zatížení došlo téměř k úplné ztrátě $\text{Ca}(\text{OH})_2$, K a Na. Nicméně v případě s porcelánem sice došlo k poklesu prvků Ca a K, ale ne k úplnému vyloučení. Přítomnost Si byla zjištěna ve velmi vysoké úrovni a byla zjištěna také přítomnost prvků jako je Al, Fe a Mg. V matrici s porcelánem byly zachovány Ca a Si, jež jsou staveními kameny pevností cementového kompozitu.

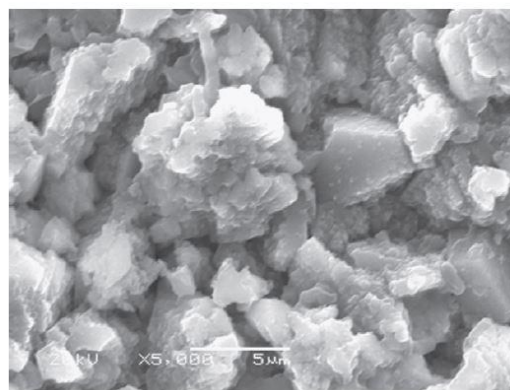


(a) before the fire test

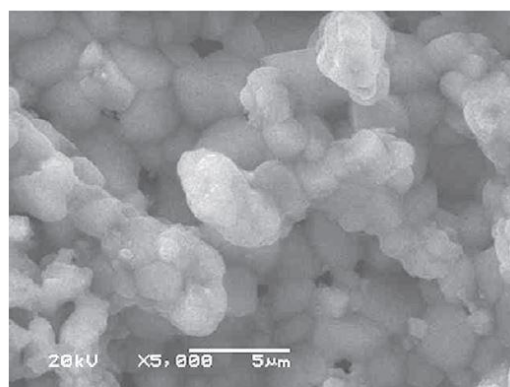


(b) after the fire test

Fig. 5. SEM microstructures of the mixture without porcelain (FIC100P0).



(a) before the fire test



(b) after the fire test

Fig. 6. SEM microstructures of the mixture with porcelain (FIC100P15).

Obr. 7 : Mikrostruktura (vlevo bez přidavku porcelánu, vpravo s 15 % porcelánu)[18]

V této studii se testovalo použití vysokopecní strusky jako náhrady cementu při zatížení vysokou teplotou, spolu s přidáním porcelánu a polypropylenových vláken. Tato modifikace složení měla zajistit lepší požární odolnost. Při 100% nahrazení cementu struskou bylo dosaženo vyšších pevností v tlaku, což mohlo být zapříčiněno vyšší hut-

ností směsi. Vyšší pevnost v tlaku po teplotním zatížení vykazovaly směsi s množstvím porcelánu v důsledku vytvoření sklovité struktury. Užití vláken má své opodstatnění, předchází explozivnímu odprýskávání a drolení směsi. Směs obsahující 0,1 % polypropylenových vláken, 100% substituce cementu vysokopecní struskou a přídatkem 15 % porcelánu splnila požadavek na pevnost v tlaku a vykazovala vynikající odolnost proti ohni. Toto složení se jeví jako ideální směs pro ekologickou protipožární ochranu.

Vhodné by bylo ověřit i průběh odolnosti např. při 600 a 1000 °C. Tyto teploty jsou považovány za kritické. Důvodem je především skutečnost, že při 1000 °C může dojít k velmi výraznému poklesu pevností a k téměř rozpadu struktury daného kompozitu. Při dalším zahřívání dochází ke zpevňování struktury vlivem tvorby nových vazeb, slinování atd.

4.3 Stanovení charakteristik po teplotní expozici s využitím lehkého kameniva

Vývoj a výzkum požárně odolné malty obsahující lehké kamenivo agloporit je prezentovaný v publikaci [20] Složení kompozitu je na bázi cementové matrice. Obsahuje cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5. Tento cement obsahuje 65 % slínku a 35 % příměsí. Příměsí je vysokopecní struska a vápenec. Objemový poměr cementu ku kamenivu byl 1:3,7. Pro požadovanou zpracovatelnost byla použita polymerní přísada v množství 3 % z hmotnosti cementu.

Plnivem bylo vybráno lehké kamenivo popílkový agloporit s frakcí 0-4 mm. Pro zlepšení parametrů při teplotním zatěžování byla použita polyolefinová fibrilovaná vlákna větších rozměrů v dávce 5 kg.m⁻³. Pro splnění požadavku vyvýjené malty se statickou funkcí, byla přidána příměs (mikrosilika) na bázi amorfního SiO₂. Dávkování v množství 5-10 % z hmotnosti cementu.

Tělesa poté byla testována na teplotu 200, 400, 600, 800 a 1000 °C. Chlazení probíhalo v peci 1 °C/min.

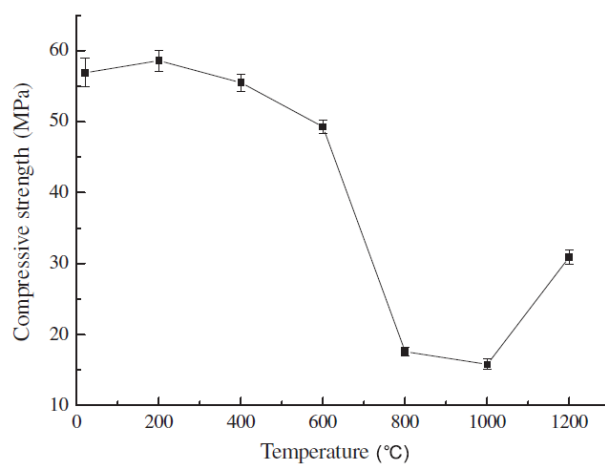
Průběhy poklesu objemových hmotností s rostoucí teplotou jsou poměrně vyrovnané. Při teplotě 1000 °C činil pokles OH až 21 %. K nejvíce strmému poklesu OH dochází v rozmezí teplot 22 - 400 °C. Z pohledu pevností v tlaku, lze nejlépe vyhodnotit

recepturu se 7,5 % mikrosiliky. Pevnosti malt s 5 % mikrosiliky zatížených 1000 °C vykazují cca 17 % zbytkové pevnosti. Hmoty s vyšší dávkou mikrosiliky 7,5 a 10 % mikrosiliky vykazují zbytkovou pevnost cca 24 %. Nejznatelnější rozdíl pevností je u malty s obsahem 5 a 7,5 % mikrosiliky. V případě pevností v tahu za ohybu dochází k poklesu pevností cca o 40 %. Nejlépe vychází malta se 7,5 % mikrosiliky.

Z výsledků vyplývá optimální dávka mikrosiliky 7,5 %. Návrh pro další zlepšení parametrů ve vývoji může být vhodnou modifikací cementového pojiva. Konkrétně v poměru 60 % portlandského cementu a 40 % vysokopecní strusky. Tím by došlo k vyloučení vápence z pojivové složky. Došlo by ke zvýšení aktivní latentně hydraulické složky. Ta má též příznivý vliv na tepelnou odolnost cementové matrice. Vhodné by bylo zaměřit se také na další důležité aspekty, jako je soudržnost s podkladem a trvanlivost.

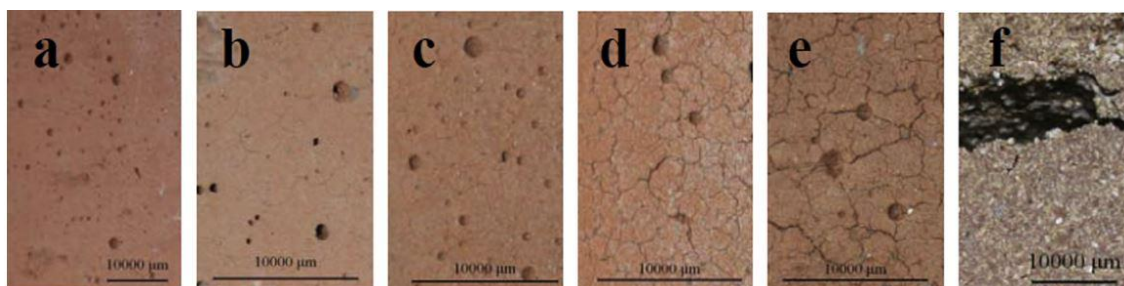
4.4 Vývoj geopolymerní malty s obsahem 70 % kalcinované rudy - hlušiny a 30 % granulované vysokopecní strusky

V publikaci [13] se autoři zabývali výzkumem geopolymerní malty, která obsahovala 70 % kalcinované rudy - hlušiny a 30 % mleté granulované vysokopecní strusky aktivované 20% roztokem Na_2SiO_3 s $M_s = 1,8$. Podle *Obr. 8* a *Obr. 9* došlo při zvýšení teploty k postupnému smršťování, praskání a následné významné ztrátě pevnosti při teplotách 800 °C a 1000 °C. Při zahřívání na teplotu 1200 °C docházelo ke slinování struktury a nárůstu pevnosti až o 100 % oproti pevnosti při zatížení 1000 °C. Tento nárůst byl zapříčiněn tvorbou struktury anortitu, který pomohl k regeneraci vzorku. Bylo zjištěno, že zavedení vápenných iontů do krystalické fáze při vysokých teplotách znamená, že CaO má velký vliv na tepelné vlastnosti geopolymery.



Obr. 8 : Vliv průběhu zatěžování na pevnosti v tlaku [13]

Na obrázku níže Obr. 9 vidíme vznik trhlinek při tepelném zatížení od 200 do 1200 °C.



Obr. 9 : Vizuální porovnání malty po teplotním zatížení (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C, (d) 800°C, (e) 1000°C, (f) 1200°C [13]

B) Experimentální část

V experimentální části diplomové práce bude kladen důraz na laboratorní ověření nově navržených receptur jemnozrnných správkových hmot. Konkrétně se bude jednat o selekci potenciálně vhodných složek správkových malt a návrh receptur pro následné odzkoušení. Výběr jednotlivých složek bude proveden především na základě rešerší a z vlastního výzkumu. V první řadě bude pozornost věnována kamenivu, které zaujímá největší procentuální podíl v objemu správkových malt. Dále pak na pojivo, jemnozrnné příměsi, výběr polymerního modifikátoru a vlákna. Všechny tyto složky správkových malt jsou důležité pro požadované vlastnosti a následnou úpravu konečného stavu dle potřeb daného projektu, jako je např. pevnost, přidrženost, objemové změny apod.

5 Metodika práce

Diplomová práce je vzhledem k rozsahu řešené problematiky rozčleněna do několika etap, jejichž obsah je podrobně specifikován v následujícím textu. Celkem se jedná o 7 etap:

- výběr vhodných primárních i alternativních surovin;
- sestavení receptur;
- návrh tepelných expozičních podmínek a příprava zkušebních těles;
- sledování objemových změn v průběhu zrání,
- tepelná expozice malt při extrémních podmínkách vč. šokového chlazení;
- testování základních parametrů tepelně zatížených správkových malt;
- zhodnocení výsledků a zjištění.

První etapa je věnována selekci vhodných složek vyvíjených malt. Vzhledem k tomu, že malty budou určeny do náročných expozičních podmínek, bylo třeba pozornost věnovat jak jednotlivým složkám zvláště, tak jejich spolupůsobení. Studium bylo realizováno pouze v teoretické rovině na základě rešerší z odborných článků a již dosažených výsledků. Důraz je kladen na všechny podstatné aspekty, tj. dosažení požadovaných parametrů pro třídu správkové malty R3 nebo R4 (objemová hmotnost, pevnost

v tlaku, soudržnost s podkladem atd.) a současně při zohlednění zajištění dostatečné odolnosti vůči náhlým změnám extrémních teplot. Toto tedy zahrnuje pečlivý a opodstatnění výběr vhodného typu pojiva, plniva, aktivních přísad, polymerní přísady a rozptýlené výztuže na makromolekulární bázi, neboť každá z těchto složek, příp. jejich synergické působení zajišťuje požadované parametry daného kompozitního systému.

V **druhé etapě** experimentální části byly sestaveny a ověřeny základní receptury. V první řadě se jedná o návrh vhodného složení směsného pojiva, kdy je snaha o využití i některých alternativních surovin. Dále s ohledem na zajištění potřebných parametrů jak v čerstvém tak zatvrdlém stavu bylo nutné optimalizovat poměr mezi pojivem a plnivem. Vodní součinitel nejvíce souvisí s konzistencí, tj. zpracovatelností v čerstvém stavu a dále pak i finální pevností, pórovitostí a tím i odolností vůči teplotním šokům. Proto bude při návrhu jednotlivých receptur ověřena i dávka vody. V souvislosti s požadavkem na správkové malty min. třídy R3 a jemnozrnným plnivem do 2 mm je pevnost celé matrice je důležitou funkcí. Modifikace aktivními přísadami z alternativních surovinových zdrojů nejen snižuje výslednou cenu na správkové hmoty, ale také zlepšuje zpracovatelnost a lepidlo (přilnavost malty v čerstvém stavu). Z tohoto důvodu bude ověřeno několik variant přísad. Složení cementu s přísadami pozitivně ovlivňuje mnoho podstatných parametrů malt a to jak v čerstvém, tak zatvrdlém stavu.

Nedílnou součástí kompozitů určených do náročných teplotních podmínek je rozptýlená výztuž. Proto byly testovány různé druhy vláken a jejich vliv na konzistenci, zpracovatelnost a tepelnou odolnost malty. S ohledem na výzkum, který proběhl v této oblasti je patrné, že důraz bude kladen na vlákna makromolekulární. Zkušební tělesa byla zatěžována do maximální teploty 500 °C. Teplota 500 °C je nastavena jako maximální z důvodu vyloučení vlivu modifikačních přeměn křemene a tím možných objemových změn. Byl testován vliv vláken a jejich příspěvek k vyšší odolnosti malty proti požáru. Vlákna při požáru vyhoří a vytváří prostor na zmírnění tlaku vodní páry, který způsobuje explozivní odprýskávání. Na základě ověření budou sestaveny optimalizované receptury pro následující etapy výzkumu.

Třetí etapa je věnována přípravě zkušebních těles a dále volbě vhodného zatěžovacího tepelného režimu. Při přípravě zkušebních těles byly brány v potaz reálné podmínky výroby na staveništi, tj. příprava suché směsi (tak jak je dodávána v pytlech) a její smísení s vodou pomocí míchadla. Byla sledována především zpracovatelnost při přípravě a hutnění do forem vč. orientačního posouzení lepivosti. Při sestavení režimové teplotní křivky je především využito tuzemských platných technických norem. Rovněž bylo nutné zohlednit dostupné laboratorní vybavení Ústavu technologie stavebních hmot s ohledem na časovou náročnost provádění experimentů. Z hlediska novosti výzkumu byla pozornost soustředěna zejména na rozdílné podmínky chlazení – pozvolné a několik typů šokového.

Zatěžování probíhalo do teploty 1000 °C a u vybraných receptur do 1200 °C. Vybrané receptury byly také ověřeny z hlediska vlivu tepelné expozice na soudržnost s betonovým podkladem. Zde se jednalo o odlišný průběh testování. Provedena byla zkouška plamenem o teplotě cca 1000 °C s následným náhlým ochlazením.

Čtvrtá etapa je zaměřena na sledování objemových změn malt v průběhu zrání. K tomuto účelu bylo využito optického zařízení v kombinaci s výpočetní technikou pro záznam naměřených údajů.

Po 28 dnech zrání byla v rámci **páté etapy** tělesa exponována v extrémních teplotních podmínkách při následném působení předem definovaných rozdílných způsobů chlazení. Zde byl důraz kladen na sledování změn při a po chlazení – vizuální posouzení tvorby trhlin či odprýskávání, resp. odlupování povrchových vrstev betonu.

V **šesté etapě** řešení, která zaujímá dominantní část práce, byly testovány základní podstatné materiálové vlastnosti zkoumaných malt. Jedná se především o parametry definované v [6] [Tab. 1].

testované vlastnosti:

- změna rozměrů
- objemová hmotnost
- pevnost v tlaku
- pevnost v tahu ohybem
- soudržnost

Poslední **sedmá etapa** bude zaměřena na zhodnocení všech dosažených výsledků s vyvozením závěru pro případný navazující výzkum, dopad na životní prostředí, odpadové hospodářství, potenciál pro trh.

6 Použité zkušební metody

6.1 Stanovení zrnitosti kameniva- síťový rozbor

Podstatou zkoušky je roztržení navážky kameniva a oddělení jednotlivých frakcí pomocí sady sít dle velikosti částic. Zkouška probíhá v souladu s ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor. Hmotnost částic zachycených na sítích se uvádí v procentech k hmotnosti navážky.

Postup zkoušky:

- příprava zkušebních navážek - navážka se vysuší při teplotě 110 ± 5 °C do ustálené hmotnosti = M1

- praní - kamenivo se vloží do nádoby naplněné vodou a promíchá se - nutno uvolnit jemné částice

- prosévání - přes sadu sít dle normové řady

- vážení - odebírají se jednotlivá síta, váží se zachycený materiál a zaznamenává se hmotnost R1, R2, Ri, hmotnost materiálu na dně se označí P

- pokud se součet hmotností Ri+P odlišuje od M2 o více jak 1 %, musí se zkouška opakovat

Vypočítá se zachycená hmotnost na každém síti jako procento k původní suché hmotnosti M1. Vypočítá se souhrnné procento propadů každým sítem z původní suché hmotnosti až k sítu 0,063mm. Vypočítá se procento jemných částic f propadlých sítem 0,063.

6.2 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty

Podstatou zkoušky je zjištění objemové hmotnosti ztvrdlé malty. Zkouška probíhá v souladu s ČSN EN 1015-10 Zkušební metody malt pro zdivo - Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty.

Postup zkoušky:

- Objemová hmotnost ztvrdlé malty bude stanovena na sadě zkušebních trámečků
- Zvažte hmotnost všech těles s přesností 0,01g
- Změřte rozměry každého vzorku pomocí posuvného měřítka (přesnost 0,1 mm), každý rozměr bude změřen minimálně 3x, spočítejte průměrnou hodnotu pro každý měřený rozměr

- Z hmotnosti a průměrných rozměrů stanovte objemovou hmotnost
- Výsledek se zprůměruje ze dvou měření a zaokrouhlí se na 10 [kg.m⁻³]

Vzorec pro vyjádření výsledku:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m - hmotnost vysušeného tělesa [kg]

V - objem tělesa [m⁻³]

6.3 Pevnost v tahu ohybem

Podstatou zkoušky je určení pevnosti v tahu ohybem na zkušebních tělesech dle ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Zatížení zkušebních těles může být prováděno jedním nebo dvěma břemeny.

Postup zkoušky:

- očištění tlačných ploch
- středové uložení zkušebního tělesa s přesností ± 1 %
- zatěžování rychlostí 0,04-0,06 MPa/s
- Hodnota pevnosti v tahu se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa

Vzorec pro vyjádření výsledku zatížením jedním břemenem:

$$f_b = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} [\text{MPa}]$$

F - maximální zatížení [N]

l = 3d-vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

b - šířka zkušebního tělesa [mm]

h - výška zkušebního tělesa [mm]

6.4 Pevnost v tlaku

Je jednou z nejdůležitějších posuzovaných vlastností. Zkouškou zjišťujeme pevnost v tlaku správkových hmot v souladu dle ČSN EN 12 190 - Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt. U malt typu PC, PCC a CC je podstatou zkoušky stanovení pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech ve tvaru krychle o hraně 40 mm. Alternativní metoda používá tělesa ve tvaru hranolu o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm. Pevnost v tlaku se stanoví na šesti zkušebních tělesech tvaru krychle nebo hranolu dle ČSN EN 196-1. Stáří malty v době zkoušky musí odpovídat požadavku uvedenému v normách řady 1504. Výstupem zkoušky je hodnota pevnosti v tlaku v MPa.[25]

Vzorec pro vyjádření výsledku:

$$f_c = F/A_c \text{ [MPa]}$$

F-maximální zatížení [N]

A_c-zkoušená plocha o velikosti 1600 mm²

6.5 Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou

Zkouškou zjišťujeme soudržnost správkových malt se stávajícím podkladem. Soudržnost správkové malty s podkladem provádíme v souladu s normou ČSN EN 1542 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou. Zkoušená malta se nanese na očištěný zkušební vzorek ve stejné tloušťce. Pro správné provedení zkoušky je důležité, aby kohezní vlastnosti a přilnavost lepidla byla vždy větší než zkoušené malty. Zkouška se provádí pomocí ocelových terčů o průměru 50 mm a trhačího zařízení např. Dyna Proceq Z16. Rychlost zatěžování musí být rovnoměrná v intervalu 0,04-0,06 MPa/s. Výsledek zkoušky je odtrhová síla v Newtonech (N) a A je plocha odtahového terče v mm². Také zaznamenáváme způsob a místo porušení.[16]

7 Výsledky a zjištění

7.1 Výběr vhodných surovin

7.1.1 Kamenivo

Kamenivo je procentuelně nejvíce zastoupenou částí v maltě, proto bylo třeba při jeho výběru postupovat velmi pečlivě. Výběr plniva pro jemnozrnné správkové hmoty byl učiněn na základě informací z odborných publikací a již dosažených výsledků. Zohledněno bylo především mineralogické složení, s čímž úzce souvisí chování při extrémních teplotách. Popílkový agroporit je pórovité a uměle vyrobené kamenivo, které je vyráběné z vedlejších energetických produktů. Druhým použitým kamenivem je amfibolit. Amfibolit je hornina metamorfovaná podobná čediči.[10] Mineralogické složení je důležité především z hlediska objemových změn kameniva při teplotním zatížení. Při teplotním zatížení je důležitá teplota 573 °C, neboť při této teplotě dochází k modifikační přeměně křemene a zvětšování objemu kameniva. Z těchto důvodů je důležité, aby kamenivo obsahovalo co nejméně krystalické fáze křemene, aby objemové změny byly co nejmenší. U lehkého kameniva příznivě působí pórovitost kameniva na únik vody při zvýšené teplotě. Dále i modul pružnosti (poddajnost teplotně-dilatačním změnám polymer-cementové matrici) a tepelná vodivost lehkého kameniva.[26]

Amfibolit

Amfibolit je jemnozrnná hornina, která má obvykle zelenošedou barvu. Amfibolit se vyznačuje vysokou pevností v tlaku a nízkou nasákavostí a umožňuje výrobu drtí v nejvyšších kvalitách. Jedná se o metamorfovanou horninu, která je těžce rozpojitelná. Jedná se o přírodní hutné kamenivo hojně využívané ve stavebnictví, zejména pro vysokou pevnost a nízkou nasákavost. [12]

Popílkový agloporit

Popílkový agloporit je uměle vyráběné kamenivo. Jedná se o pórovité kamenivo vyráběné slinováním krátkodobým výpalem na aglomeračních rostech. Výhodou tohoto kameniva je nízká pořizovací cena, spotřeba druhotných surovin z energetického či ji-

ného průmyslu a vlivem objemové hmotnosti snížené náklady na přepravu. Aglomerace na slinovacích roštích může být prováděna s různorodými surovinami - od škáry, popílků, uhelné kaly až po odpady z domácnosti.[9]

Popílkový agloporit použitý v této práci je vyroben samovýpalem z vysokoteplotního popílku z elektrárny Ledvice. Složení agloporitu je následující - 39,3 % mullit, amorfni fáze 39 %, a krystalického SiO_2 7 %. Před samotným použitím kameniva ho musíme nechat nasáknout vodou, neboť pokud nedodržíme tento postup, dochází k odebrání vody, která je potřebná při hydrataci cementu.

7.1.2 Pojivo

Do této práce byl s ohledem na splnění požadavků minimální třídy R3 pro správkové malty vybrán cement CEM I 42,5 R, který je sice dražší než cementy směsné, ale vykazuje vyšší pevnosti. Cement je hydraulická maltovina, což znamená, maltovina schopná tvrdnutí pod vodou. Vzniká pálením vhodných surovin, vápence a jílu při teplotách kolem 1450°C . Tento cement byl modifikován příměsemi, konkrétně vysokopecní struskou, vysokoteplotním popílkem a mikrosilikou.

7.1.3 Příměsi

Příměsi stejně jako jiné materiály musí odpovídat příslušným evropským nebo státním normám. Jedná se jemnozrnné práškové materiály anorganického původu. Velikost zrn je menší než 0,25 mm, obvykle menší než 0,125 mm. Přidávají se za účelem zlepšení vlastností malty, zejména ovlivnění konzistence. Nejpoužívanějšími příměsemi do malt jsou vysokopecní struska, popílek či mikrosilika.[23]

Vysokopecní struska

Vysokopecní struska se používá i jako částečná náhrada portlandského cementu. Dávkuje se pro zlepšení či dosažení určitých vlastností v čerstvém i ztvrdlém stavu. Struska má latentně hydraulické vlastnosti. Nejznámější jsou strusky vznikající při tavení a rafinaci kovů z vysokých pecí.[15] V publikaci [21] je zaznamenán pozitivní vliv vysokopecní strusky, jako náhrady části cementu, zlepšující tepelnou odolnost celé matrice cementového kompozitu.

Vysokoteplotní popílek

Popílek je jemnozrnný anorganický pucolánový materiál. Popílek je vedlejší elektrárenský produkt. Vzniká při spalování z fosilních paliv při teplotě 1400-1600 °C. Vlastnosti popílků se mění v závislosti na lokalitě a na technologii spalování. Proto mohou mít popílků proměnlivé vlastnosti jak z hlediska chemického, mineralogického i granulometrického. Do malt se přidává za účelem zlepšení nebo dosažení určitých vlastností malty jak v čerstvém, tak ztvrdlém stavu. V tuzemsku jsou k dispozici dva druhy popílků, a to z černého uhlí a především z hnědého uhlí, které jsou méně kvalitní. Popílek je latentně hydraulický, což znamená, že je schopen stejně jako struska reagovat s Ca(OH)_2 a za normální teploty ve vodě tvrdnout.[17][23]

Mikrosilika

Jedná se o velmi jemné částice vysoce aktivního anorganického pucolánového materiálu. Mikrosilika v maltě vyplňuje prostor mezi zrny cementu a kameniva a zhutňuje strukturu malty. Zvyšuje soudržnost a hutnost malty a tím zvyšuje i pevnost celé matrice. Značí se vysokým obsahem oxidu křemičitého cca 65-99 % podle kvality výrobku. Z toho cca 93% amorfního oxidu křemičitého, který nepřispívá k modifikační přeměně oxidu křemičitého. Dávkování je doporučeno do max. 10 % z hmotnosti cementu. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.[17]

7.1.4 Voda

Záměsová voda byla použita z vodovodního řádu. Tato voda splňuje požadavky na záměsovou vodu uvedené v normě ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně jako záměsové vody do betonu.

7.1.5 Polymerní modifikátor

Z výstupů [8] vyplývá, že příznivé vlastnosti polymerní přísady na bázi polyvinylacetátu, se projeví v dávce 3 % z hmotnosti cementu jak na zpracovatelnost, tak i na přilnavost a lepivost malty. Výstupy se sice týkají hrubozrnné malty, lze ovšem před-

pokládat obdobné chování také u malt jemnozrnných. Jedná se o polymerní modifikátor upravující konečné vlastnosti malt. Polymerní modifikátor zlepšuje zejména soudržnost malty, přilnavost malty k podkladu a má příznivý vliv na zpracovatelnost celé směsi. Na základě rešerší byla vybrána polymerní přísada Vinnapas. Jedná se bílý prášek s doporučeným dávkováním do 5%.

7.1.6 Rozptýlená výztuž

Pro výzkum byly vybrány dva typy vláken na makromolekulární bázi – celulózová a polypropylenová. Jedná se o vlákna s označením Ultra Fibre 500, přírodní na bázi celulózy. Druhým typem vláken jsou polypropylenová vlákna Fibrin 315. Vlákna byla do malty navržena z důvodu zatěžování extrémními teplotami. Vlákna při teplotním zatížení vyhořívají a vytváří systém kapilárních pórů. Úlohou vláken v maltě či betonu je zmírnit tlak vodní páry ve struktuře kompozitu zatěžovaného vysokou teplotou. Při nevytvoření systému kapilárních pórů, může docházet k explozivnímu odprýskávání povrchových vrstev vlivem rozpínání vodní páry. Může dojít i k úplnému obnažení výztuže. Důležité je správné dávkování vláken. Nižší dávka vláken nemusí splnit očekávaný výsledek, vyšší než doporučená dávka může oproti tomu zhoršit zpracovatelnost směsi a pevnosti v tlaku. Doporučené dávkování je 450 g/m^3 . [22][24]

7.2 Sestavení receptur

Příprava zkušebních těles probíhala na základě požadovaných parametrů v souladu s příslušnými normami a také se zohledněním reálných podmínek výroby na staveništi.

7.2.1 Vliv vláken

Zkušební tělesa vyrobená pro účel výběru vhodnějších vláken do správkových hmot s jemnozrnným plnivem a s vyšší odolností proti extrémním teplotám, byla namíchána s kamenivem amfibolit frakce 0-2. Byly namíchány dvě záměsi. Složky byly smíchány nejprve v suchém stavu, aby došlo k dokonalejšímu rozmísení vláken a až poté byla přidána voda. Přidáním vláken se projevila nepatrně horší zpracovatelnost a doba míchání se mírně prodloužila cca o dvě minuty. Dávkování vláken probíhalo v množství

doporučeném od výrobce, tj. celulózová vlákna v dávce $0,45 \text{ kg/m}^3$ a polypropylenová vlákna v dávce 1 kg/m^3 . Hutnění probíhalo na vibračním stole a po ztvrdnutí byla tělesa testována do maximální teploty $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota $500 \text{ }^\circ\text{C}$ je nastavena jako maximální z důvodu vyloučení vlivu modifikačních přeměn křemene a tím možných objemových změn. Zkoušen je vliv vláken a jejich přispění k vyšší odolnosti malty proti požáru. Testování probíhalo po expozici těles při teplotách 22, 200, 300, 400 a $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Vlivem požáru, kdy teplota dosahuje více jak $100 \text{ }^\circ\text{C}$, se voda odpařuje a přeměňuje na plynné skupenství a se zvyšující teplotou se zvyšuje tlak vodní páry ve struktuře správkové malty. Tento tlak negativně ovlivňuje strukturu a může zapříčinit vznik trhlinek. Aby se zamezilo negativního dopadu výše uvedeného, přidávají se do směsi vlákna, která při teplotním zatížení vyhořívají, a tím vzniká prostor ke snížení tlaku vodní páry ve struktuře správkové malty. Vlákna mají pozitivní vliv na snížení vzniku smršťovacích trhlin v průběhu zrání a jsou schopná předejít výbušnému odprýskávání sanační malty. Účelem bylo vybrat vlákna, která lépe vyhovují požadavkům správkových malt s vyšší odolností při teplotním zatížení. Po teplotním zatížení, byla tělesa otestována a lepších parametrů dosahovala směs s celulózovými vlákny. Pro následující etapy výzkumu byla tedy zvolena celulózová vlákna.

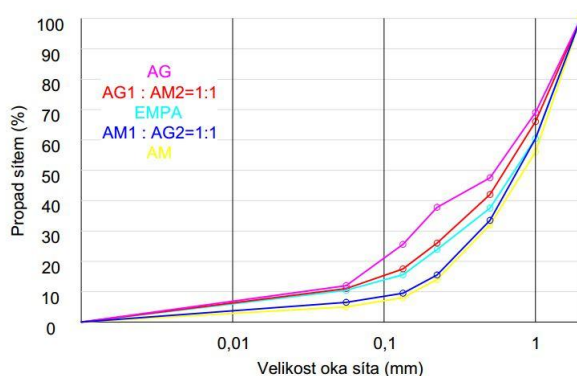
7.2.2 Vliv příměsí

Vliv příměsí byl testován na receptuře s kamenivem amfibolit, rovněž frakce 0-2 mm. Byly testovány tři typy příměsí. Zaměření probíhalo i na vodní součinitel a na zpracovatelnost malty. Vodní součinitel se pohyboval mezi 0,5 - 0,55 w/c. Testovány byly malty s obsahem vysokopecní strusky, popílku a mikrosiliky. Procentuální složení v pojivu je následující: Cement CEM 42,5 R 65%, vysokopecní struska nebo popílek v množství 35% a mikrosilika v množství 5%. Konkrétní složení pojivové složky je 65% cementu CEM I 42,5 R a 35% vysokopecní strusky a popílku (jednalo se tedy o substituční složky cementu). Další možností je přidání mikrosiliky pro zvýšení hutnosti malty a zvýšení pevnosti zejména u směsí, kde by mohlo být použito pórovité kamenivo. Mikrosilika byla dávkována v množství 5%. Jak struska, tak i popílek jsou látky latentně hydraulické, přidávají se jako náhrada cementu pro zlepšení určitých vlast-

ností, např. zpracovatelnosti, lepivosti, hutnosti malty a také z důvodu snížení celkových nákladů. Mikrosiliky se přidává v malém množství, z důvodu vysoké pořizovací ceny. Maximální doporučené dávkování mikrosiliky je do 10 %. Při dávce nad 10 % z hmotnosti cementu už není tak účinná. Při testování zkušebních těles, směsi s 5 % mikrosiliky vykazovaly pevnosti vyšší o cca 5-7 % oproti směsím bez přídavku této přísady. V celkovém porovnání vykazovaly směsi se struskou vyšší pevnosti v tlaku oproti směsím s popílčkem. Mikrosilika byla následně přidána do směsí malt s obsahem agloporitu. Poměr s větším množstvím pojiva 1:2,5 oproti 1:3 (pojivo:plnivo) vykazoval vyšší náběh pevností, tak i výsledné parametry po 28 dnech.

7.2.3 Vliv kameniva

Sítovým rozbořem byly stanoveny křivky zrnitosti jednotlivých kameniv a jejich směsí. Mísením kameniv jsme se snažili dosáhnout optimální křivky zrnitosti s minimem mezer a dosažením vyšší hutnosti malt. Snaha je co nejvíce se přiblížit ideální křivce zrnitosti, při které by mělo být dosaženo maximální hutnosti malty či betonu. Vhodný poměr jemných částic kameniva a hrubší frakce je důležitý i z hlediska přidržitosti malty k podkladu. V sítovém rozboru níže uvedeném je zřetelný rozdíl mezi jednotlivými kamenivy. Porovnání je s ideální křivkou EMPA. Lze použít i jiných metod jako Fuller či Bolomey. Na sítovém rozboru je vidět, že kamenivo agloporit obsahuje více jemných podílů než kamenivo amfibolit a více se přibližuje ideální křivce zrnitosti. Dále v porovnání pevností v tlaku je znatelný rozdíl kameniva amfibolit frakce 0-2 mm, které vykazuje vyšší pevnosti než pórovité kamenivo agloporit frakce 0-2 mm.



Obr. 10 : Sítový rozbor

7.2.4 Receptury pro následující etapy

Výběrem vhodných komponent testovaných v předešlých etapách bylo navrženo osm receptur, které se jeví jako potenciálně vhodné pro další výzkum a vývoj správkových malt s odolností vůči extrémním teplotním podmínkám, tj. na kterých byly dále testovány požadované parametry dle příslušných norem. Níže je uvedené složení receptur (viz Tab. 8 až Tab. 15).

Tab. 8 : Receptura CSM

Receptura CSM		
složka	dávkování na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	435	0,51
vysokopecní struska	234	
amfibolit (0-2)	1674	
celulózová vlákna	0,45	
polymerní přísada (Vinnapas)	20	
voda	341	

Tab. 9 : Receptura CPM

Receptura CPM		
složka	dávkování na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	435	0,52
elektrárenský popílek	234	
amfibolit (0-2)	1674	
celulózová vlákna	0,45	
polymerní přísada (Vinnapas)	20	
voda	348	

Tab. 10 : Receptura CSG

Receptura CSG		
složka	dávkování na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	435	0,11
vysokopecní struska	234	
mikrosilika	33	
agloporit (0-2)	1263	
celulózová vlákna	0,45	
polymerní přísada (Vinnapas)	20	
voda	74	

Tab. 11 : Receptura CPG

Receptura CPG		
složka	dávkování na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	435	0,12
elektrárenský popílek	234	
mikrosilika	33	
agloporit (0-2)	1263	
celulózová vlákna	0,45	
polymerní přísada (Vinnapas)	20	
voda	80	

Tab. 12 : Receptura CSG1/M1

Receptura CSG1/M2		
složka	dávkování na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	435	0,22
vysokopeční struska	234	
mikrosilika	33	
agloporit (0-1)	632	
amfibolit (1-2)	837	
celulózová vlákna	0,45	
polymerní přísada (Vinnapas)	20	
voda	147	

Tab. 13 : Receptura CPG1/M2

Receptura CPG1/M2		
složka	dávkování na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	435	0,23
elektrárenský popílek	234	
mikrosilika	33	
agloporit (0-1)	632	
amfibolit (1-2)	837	
celulózová vlákna	0,45	
polymerní přísada (Vinnapas)	20	
voda	154	

Tab. 14 : Receptura CSM1/G2

Receptura CSM1/G2		
složka	dávkování na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	435	0,28
vysokopecní struska	234	
mikrosilika	33	
amfibolit (0-1)	837	
agloporit (1-2)	632	
celulózová vlákna	0,45	
polymerní přísada (Vinnapas)	20	
voda	187	

Tab. 15 : Receptura CPM1/G2

Receptura CPM1/G2		
složka	dávkování na 1 m ³ [kg]	w [-]
Cement	435	0,29
elektrárenský popílek	234	
mikrosilika	33	
amfibolit (0-1)	837	
agloporit (1-2)	632	
celulózová vlákna	0,45	
polymerní přísada (Vinnapas)	20	
voda	194	

7.3 Návrh teplotního zatěžování a příprava zkušebních těles

Všechny složky malt byly nejprve smíchány v suchém stavu a poté byla přidána voda. U směsí s popílkovým agloporitem se nejprve nechalo nasáknout toto kamenivo a poté bylo přidáno k již smíchaným suchým složkám. Popílkový agloporit se nechal nasáknout, aby při smíchání s ostatními složkami malty neabsorboval vodu potřebnou k hydrataci. Všechny malty vykazovaly tzv. lepivou konzistenci při nabrání na zednickou lžici. U všech malt se projevila dobrá přilnavost k nanášenému povrchu. Dobrá přilnavost vynikala zejména u směsí, které obsahovali kamenivo popílkový agloporit, kde nedocházelo k trhání malty nebo lepení na lžici při nanášení na podklad. Zhutnění zkušebních těles probíhalo na vibračním stole a malta po vizuální kontrole vykazovala

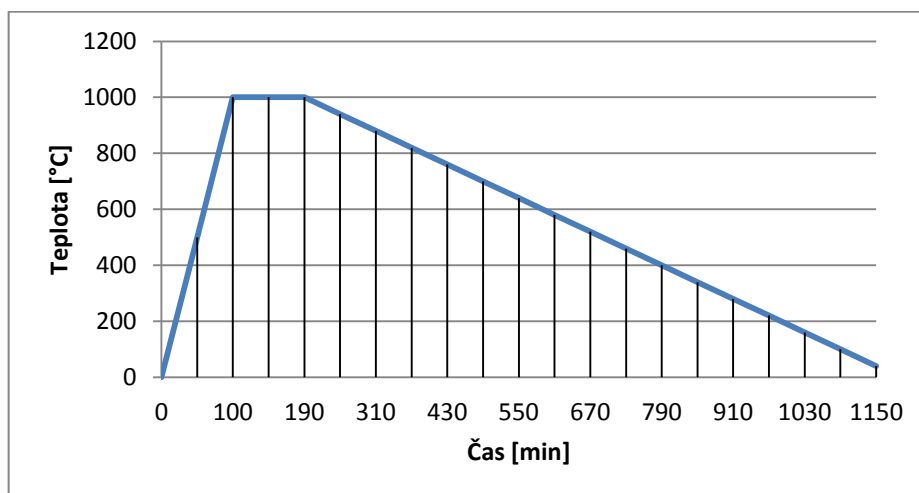
hutnou strukturu bez segregace kameniva. Užitím vláken, nebyl v průběhu zrání těchto těles zjištěn ani vznik ani rozvoj smršťovacích trhlin.

Teplotní zatěžování na vyzrálých zkušebních těles (tj. po 28 dnech) probíhalo dle dostupných možností, byly nastaveny různé teplotní rozsahy. U etapy, která stanovovala vliv a výběr vhodnějších vláken na požární odolnost, probíhalo teplotní zatěžování na teploty 200, 300, 400 a 500 °C. Do teploty 500 °C z důvodu, aby byl vyloučen vliv modifikačních přeměn v kamenivu. U všech ostatních etap probíhalo teplotní zatěžování těles na 400, 600, 800, 1000 a eventuálně u vybraných recetur na 1200 °C. Bylo vyrobeno několik sad zkušebních těles, zejména u poslední etapy, ve které byly testovány již navržené finální receptury a porovnávány různé typy chlazení. Samotná tepelná expozice probíhala v elektrických pecích ve třech fázích. S ohledem na zjištěné poznatky [13], [18], [19], [20], [21] a předchozího výzkumu týkajícího se hrubozrnných sanačních malt [8] byla snaha se co nejvíce přiblížit průběhu křivky specifikované v [5]. Nejprve teplotní nárůst, ve druhé fázi izotermní výdrž a poté chlazení. Teplotní zatěžování vždy probíhalo s teplotním nárůstem 10 °C za minutu, což bylo maximum výkonu pece. Izotermická výdrž všech těles trvala 90 minut a po skončení izotermické výdrže, docházelo k pozvolnému chlazení. Vzhledem k tomu, že byl zjištěn vliv rozdílného chlazení viz [4.1], byla pozornost věnována také tomuto faktoru, kdy budou zohledněny tři typy chlazení:

- pozvolné v peci – cca 1 °C/min;
- šokové chlazení ponořením do vody o teplotě cca 18 °C;
- šokové chlazení na vzduchu o teplotě cca 22 °C.

Při šokovém chlazení na vzduchu o teplotě cca 22 °C, byla tělesa ihned po izotermické výdrži vyjmuta z pece a uložena na izolační žáruvzdorné podložky a betonové dlaždice. Při chlazení vodou, byla tělesa vyjmuta z pece a prudce ochlazená v kádi s vodou o teplotě cca 18 °C. V grafu níže *Obr. 11* jsou vyznačeny průběhy teplotního zatěžování a chladnutí v pecích. Teplotní zatěžování bylo aplikováno i na maltách připravených pro zkoušku soudržnosti odtrhovou zkouškou. Teplotní zatěžování probíhalo na teplotu cca 1000 °C a této teploty bylo dosaženo cca po 5 minutách. Měření teploty probíhalo bezkontaktním laserovým teploměrem a výdrž na dosažené teplotě byla 15

minut. Chlazení vzorků mělo co nejvíce simulovat hašení při požáru. Ochlazení vodou na okolní teplotu trvalo cca 2-3 minuty.



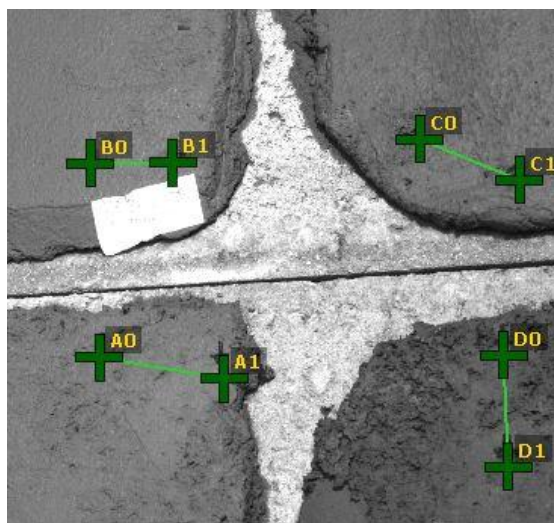
Obr. 11 : Teplotní křivka pro tělesa zatížená teplotou 1000 °C

7.4 Sledování objemových změn v průběhu zrání

Vzhledem k tomu, že výzkum byl zaměřen na nově navržené receptury, bylo třeba věnovat pozornost i sledování objemových změn v průběhu zrání. Pro tento účel bylo použito optické zařízení spolu s počítačovou technikou zaznamenávající údaje naměřené optickým zařízením.



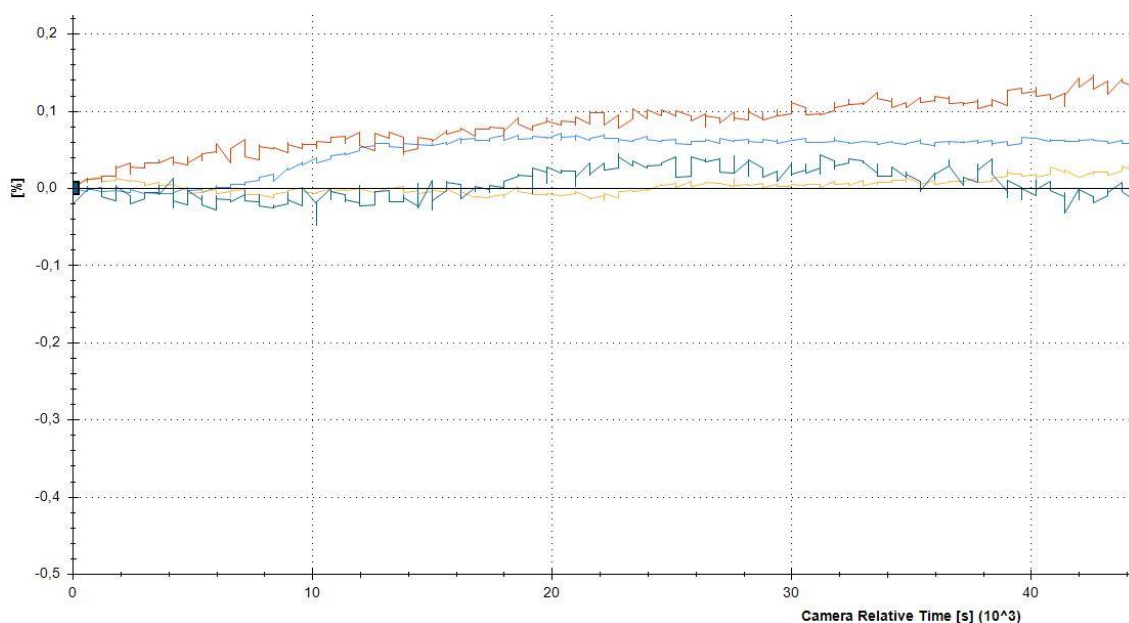
Obr. 12 : Optické zařízení snímající malty v průběhu zrání (na obrázku receptury CSM, CPM, CSG a CPG)



Obr. 13 : testované malty (A_{0-1} -CSM, B_{0-1} -CSG, C_{0-1} -CPG, D_{0-1} -CPM)



Obr. 14 : Optické zařízení pro snímání a záznam změn v průběhu zrání malt



Obr. 15 : Výstup z optického zařízení (červená-CPG, světle modrá-CSM, žlutá-CSG, zelenomodrá-CPM)

Z grafického výstupu optického zařízení, jsou patrné minimální objemové změny v průběhu zrání. Je zobrazena část výstupu, kdy docházelo k nejvýraznějším objemovým změnám. Z grafického znázornění Obr. 15 lze vypožorovat nejvýraznější objemové změny v prvních 14 hodinách, které činily max. 0,14 % u receptury CPG. Po 7 dnech byly zaznamenány maximální změny do cca 0,29 % (v případě receptury CPG). V průběhu zrání, nedocházelo tedy k výrazným objemovým změnám. Objemové změny v průběhu zrání vykazovaly zanedbatelné hodnoty v řádu desetin procenta.

7.5 Tepelná expozice malt

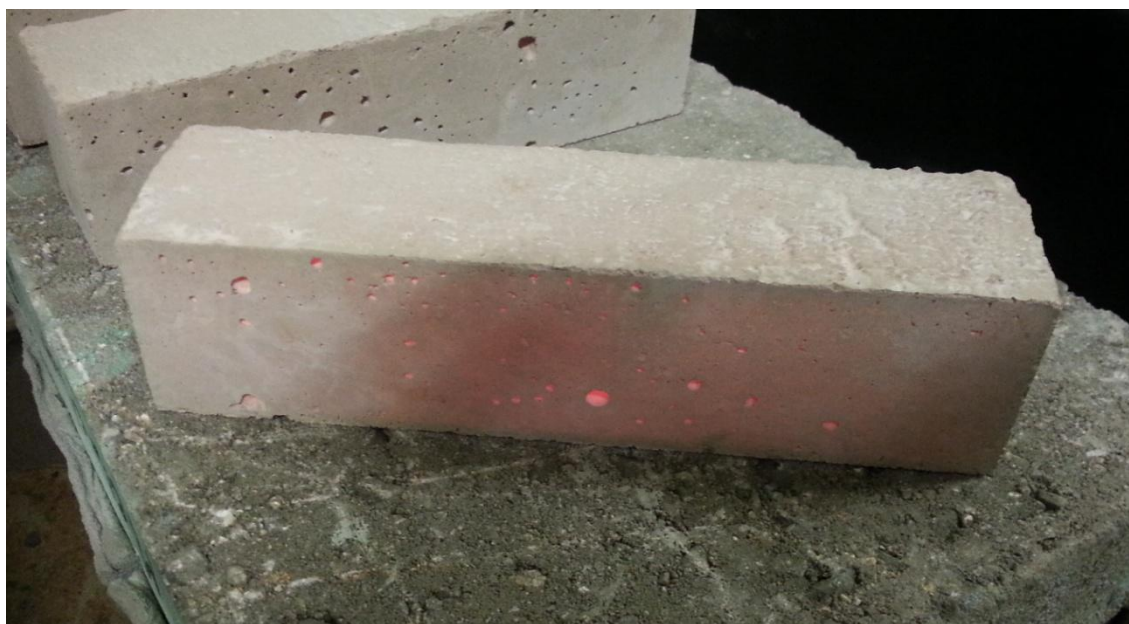
Tělesa určená k teplotnímu zatěžování, byla po 28 dnech zrání umístěna do pecí a vypálena. Průběh výpalu odpovídal teplotní křivce (viz Obr. 11), měněna byla pouze požadovaná maximální teplota na 400, 600, 800, 1000, resp. 1200 °C. Po teplotním zatížení na požadovanou teplotu v pecích a následné izotermické výdrži následovalo chlazení. U vybraných receptur byly testovány tři typy chlazení. Pozvolné chlazení v pecích, náhlé chlazení na vzduchu a prudké ochlazení vodou. Vyhodnocení testovaných parametrů se nachází níže v kapitole 7.6 vždy u jednotlivých receptur.



Obr. 16 : Teplotní zatěžování na 1000 °C



Obr. 17 : Vytažení těles z pece



Obr. 18 : Rozžhavený trámeček chlazený na vzduchu z teploty 1000 °C

Na Obr. 18 lze pozorovat rozžhavené póry na tělese právě vyndaném z pece z 1000°C.



Obr. 19 : Šokové chlazení vodou



Obr. 20 : Receptura CSM - porušení povrchových vrstev po chlazení vodou z 1000 °C

Na Obr. 20 je znatelný vliv porušení povrchových vrstev vodním chlazením. Jedná se o recepturu CSM, která nejmasivněji reagovala po vložení do vody a také s nejvýraznějším vizuálním poškozením. Při vložení do vodní lázně došlo k výraznému odprýskání povrchu těles.



Obr. 21 : Receptura CSG - rychlé chlazení vodou z 1000 °C

Na *Obr. 20* a *Obr. 21* lze zpozorovat vliv kameniva u receptur CSM a CSG na šokové chlazení vodou z teploty 1000 °C.



Obr. 22: Zatěžování teplotou 1200 °C a následná deformace trámečku CPG1/M2

Teplotní zatížení 1200 °C bylo testováno na recepturách obsahující směs kameniv. Na *Obr. 22* je patrná deformace směsi CPG1/M2. Trámeček CPM1/G2 teplotu 1200 °C vydržel a po provedení zkoušek vykazoval pevnost v tahu za ohybu 6,3 MPa, pevnost v tlaku 32,1 MPa. Pravděpodobně při takto vysoké teplotě dochází k slinování ve struktuře malty. Při testování CSM1/G2 na 1200 °C trámeček nejenže vydržel, ale vykazuje parametry srovnatelné jako bez teplotního zatížení. Pevnost v tahu za ohybu 6,3 MPa a pevnost v tlaku 36,3 MPa. Při testování CSG1/M2 nebyly naměřeny žádné parametry, trámeček se roztekl (*Obr. 23*).



Obr. 23 : Trámeček CSG1/M2 neodolal expozici při teplotě 1200 °C, kdy došlo k výrazné deformaci

Zatěžování na teplotu 1000 °C bylo aplikováno i na vzorky připravené na zkoušku soudržnosti odtrhovou zkouškou. Zatěžování probíhalo pomocí pistole a zkapalněného plynu. Chlazení mělo co nejvíce simulovat situaci při požáru, proto chlazení vodním paprskem. Vyhodnocení v kapitole 7.6.5



Obr. 24 : Teplotní zatěžování malty na zkoušku soudržnosti



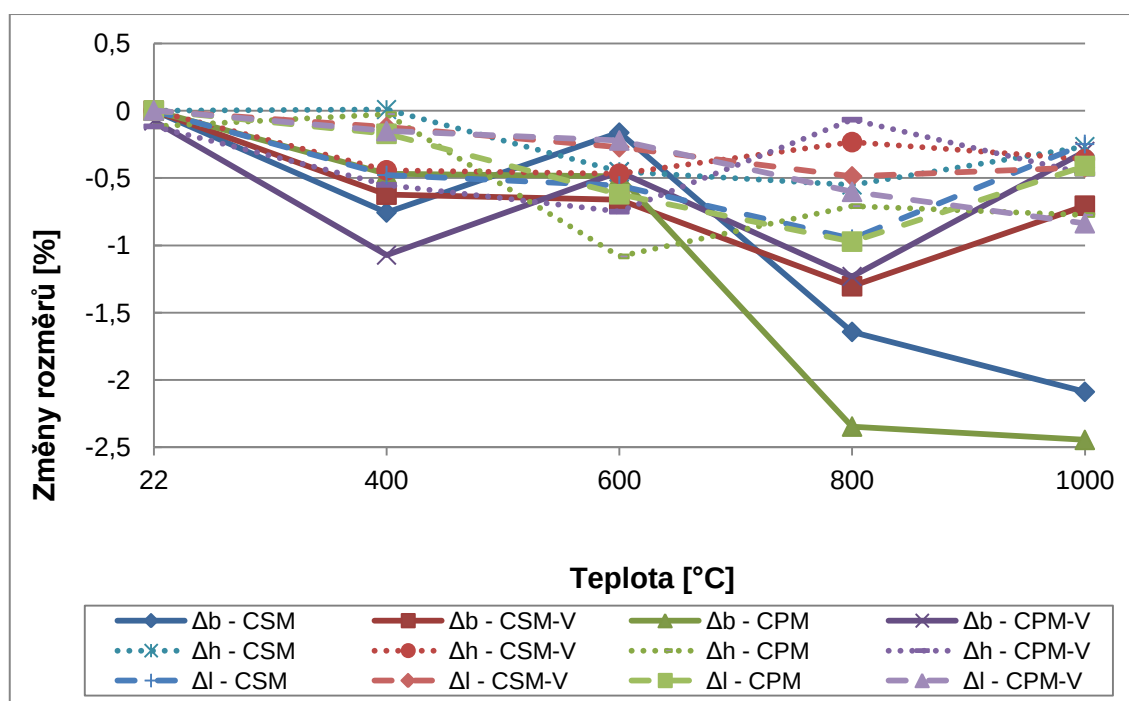
Obr. 25 : Chlazení vodním proudem o teplotě vody cca 18 °C

7.6 Testování základních parametrů malt

7.6.1 Změny rozměrů

V následujících grafech jsou znázorněny změny rozměrů po teplotním zatížení a porovnávány různé typy chlazení a jejich vliv na změnu rozměrů. Změny rozměrů byly zaznamenávány na zkušebních tělesech ve tvaru hranolu o rozměrech 40×40×160 mm a jsou vyjádřeny pro každý rozměr, tj. délku, šířku a výšku, v procentech.

V grafu níže (viz Obr. 26) jsou zobrazeny rozměrové změny u směsí CSM a CPM. Jedná se o receptury obsahující pouze plnivo na bázi amfibolitu frakce 0-2 mm. K nejmenším rozměrovým změnám dochází v případě délky. Receptury CSM a CPM obsahující kamenivo amfibolit, vykazují vyšší objemové změny zejména v případě šířky. Příčinou může být vyšší tepelná vodivost hutného kameniva.

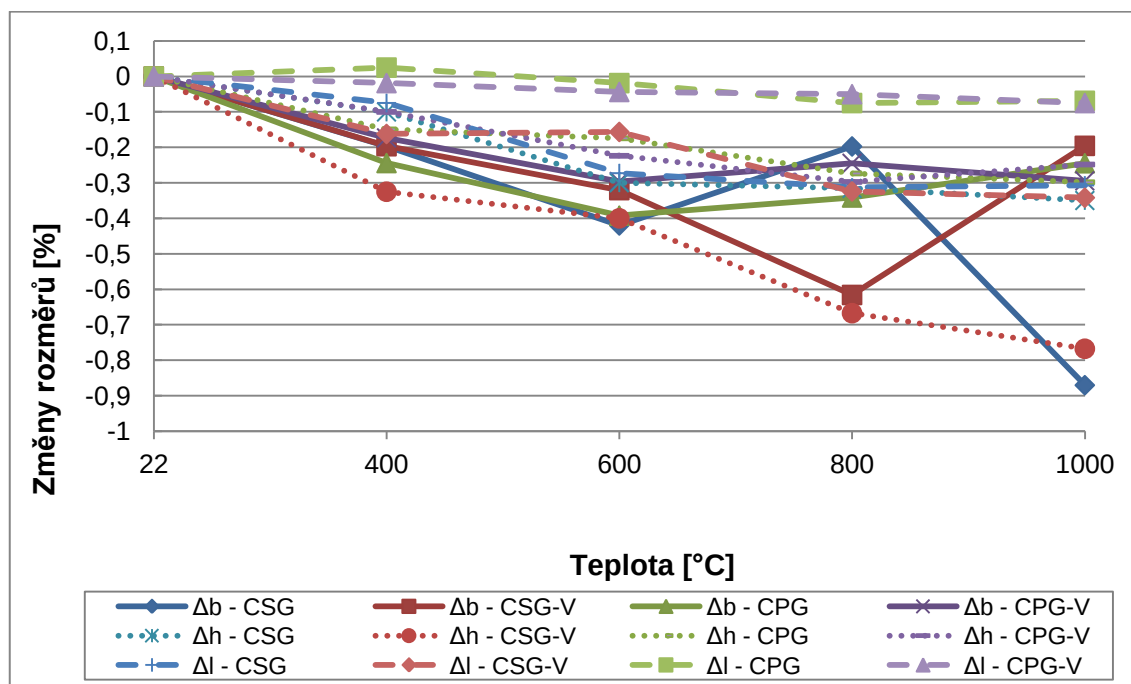


Obr. 26 : Změna rozměrů receptur CSM a CPM

Největší rozměrové změny, konkrétně smrštění byly zaznamenány v případě šířky u obou receptur při pozvolném chlazení, kdy patrně ještě docházelo k dalšímu rozkladu hydratačních produktů matrice. Zajímavá je skutečnost, kdy došlo v případě šířky

při teplotě 600 °C k nepatrným změnám, u receptury CSG blíží se téměř nulové hodnotě.

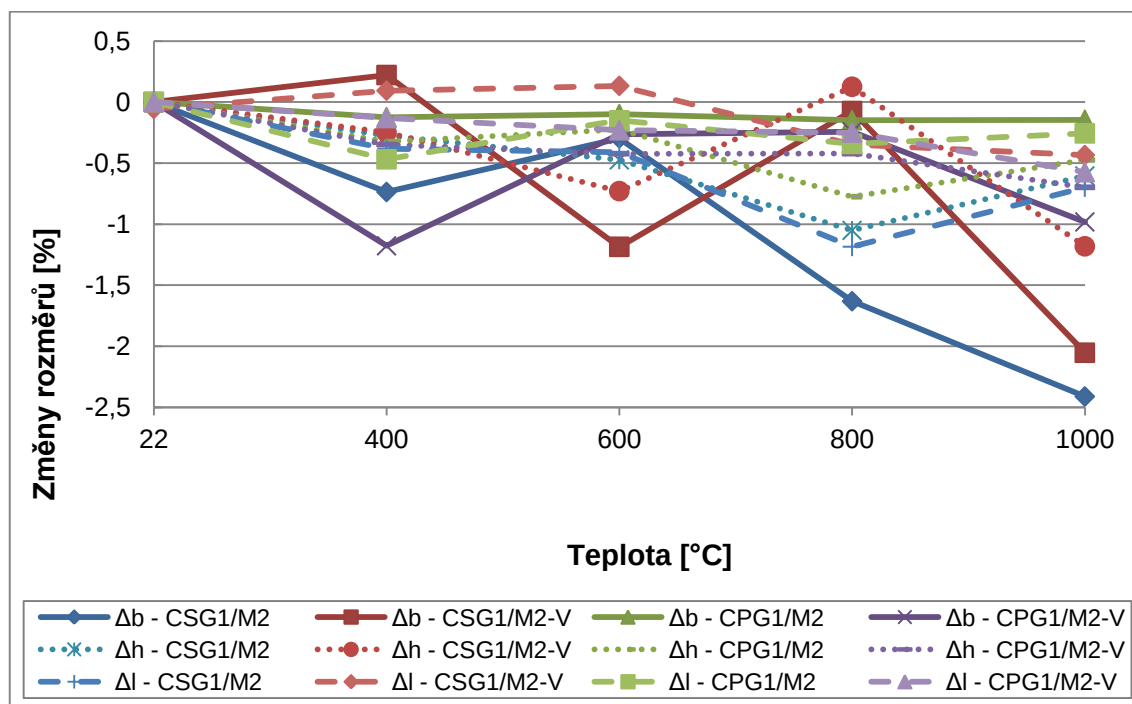
V následujícím grafu (viz Obr. 27) jsou vyhodnoceny změny rozměrů receptur CSG a CPG, tj. s na bázi popílkového agloporitu frakce 0-2 mm. K nejnižším změnám rozměrů dochází opět v případě délkových rozměrů. V porovnání s předchozími recepturami obsahujícími amfibolit se jedná o značně odlišné průběhy křivek, které lze s výjimkou Δb -CSG charakterizovat jako plynulé, kdy nejstrmější pokles byl zaznamenán v případě CSG při pozvolném chlazení a to v teplotním intervalu 800 °C až 1000 °C. Jak plyne z grafu na předchozím a následujícím obrázku (viz Obr. 26 a Obr. 27) vliv agloporitu na rozměrovou stálost je výrazný, neboť u receptur CSG a CPG byl v porovnání s CSM a CPM zaznamenán více, než o 50 % menší pokles.



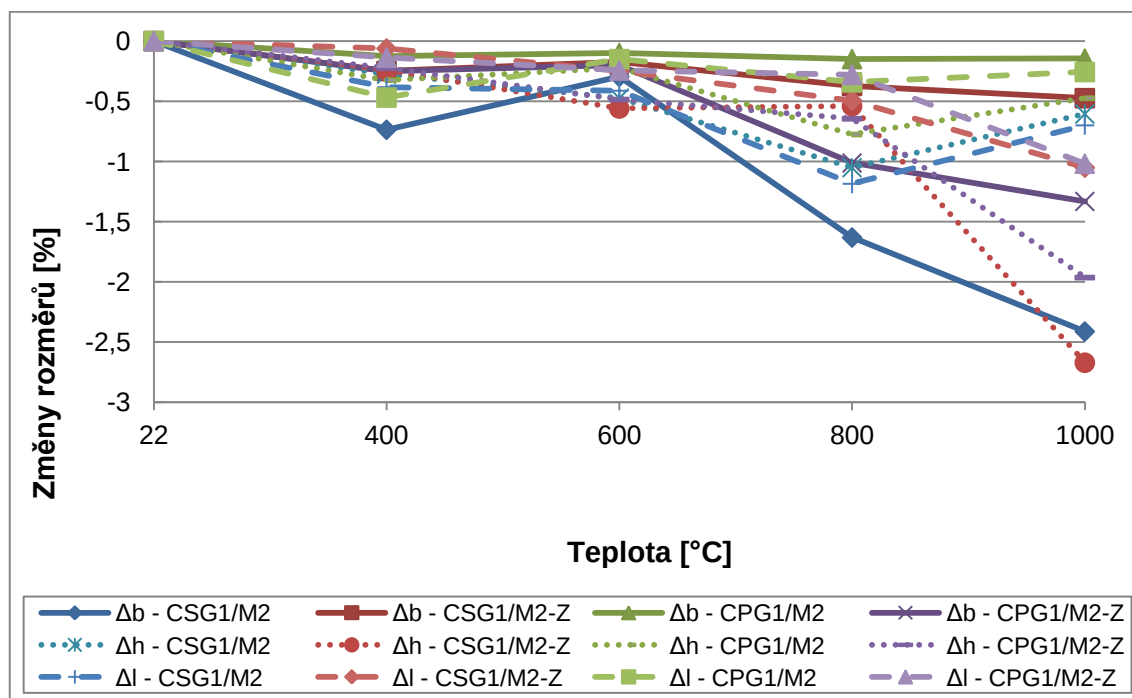
Obr. 27 : Změna rozměrů receptur CSG a CPG

Na následujících grafech (viz Obr. 28 a Obr. 29) jsou vyhodnoceny receptury CSG1/M2 a CPG1/M2. Porovnány jsou vždy změny rozměrů u pozvolného chlazení s rychlým chlazením. Receptury obsahující směs kameniv, tj. agloporit frakce 0-1, resp. 1-2 mm a amfibolit frakce 1-2, resp. 0-1 mm byly podrobeny oběma typům šokového

chlazení – na vzduchu i ve vodě. S ohledem na množství naměřených hodnot je každý typ rychlého chlazení uveden v grafu zvláště.



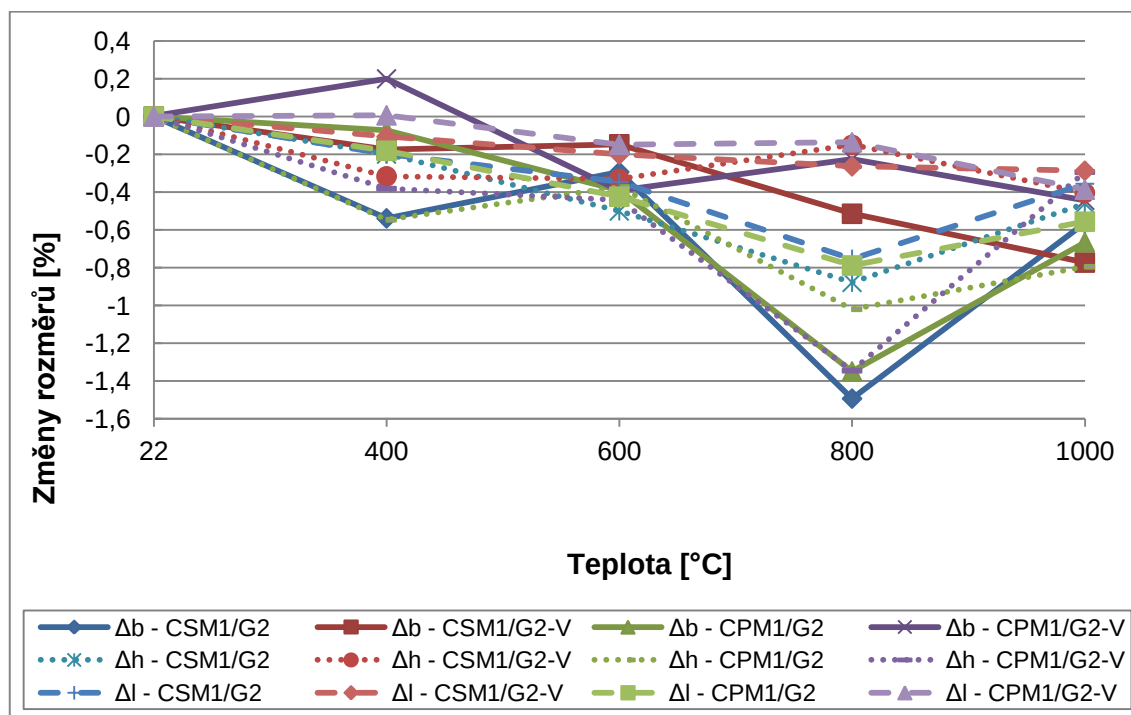
Obr. 28 : Vliv vodního chlazení na změny rozměrů u receptur CSG1/M2 a CPG1/M2



Obr. 29 : Vliv vzduchového chlazení na změnu rozměrů receptur CSG1/M2 a CPG1/M2

V případě pozvolného a rychlého chlazení vodou lze průběhy křivek změn rozměrů charakterizovat obdobně jako v případě receptur obsahujících pouze amfibolit. K nejmenším změnám dochází opět u rozměrů délek u všech typů chlazení. Z hlediska porovnání dvou typů šokových chlazení je velmi dobře zpozorovatelný rozdíl např. v případě křivky Δb -CSG1/M2-V(Z), kde je evidentní, že při chlazení vodou dochází k mnohem větším diferencím v dilatacích a to jak k zvětšení rozměrů, tak smrštění, kdežto u chlazení vzduchem dochází k velmi mírnému smrštění do cca -0,5 %.

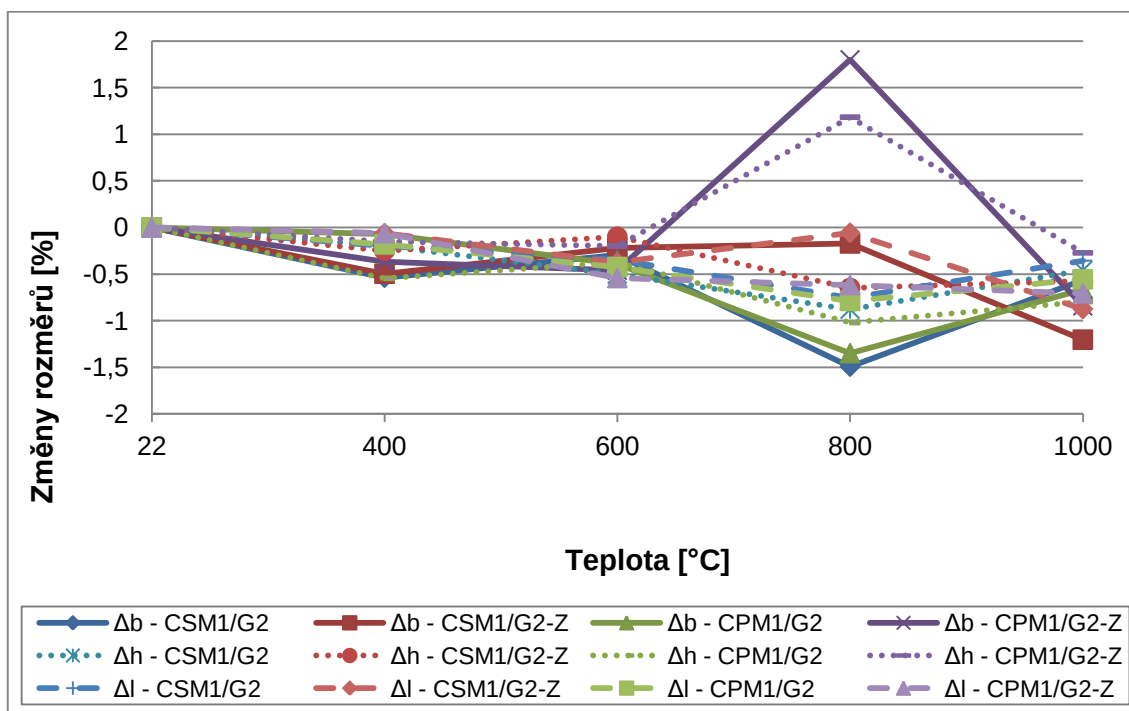
Posledními testovanými recepturami jsou CSM1/G2 a CPM1/G2, tj. s obsahem amfibolitu frakce 0-1 mm a agloporitu frakce 1-2 mm V grafech níže (viz Obr. 30 a Obr. 31) jsou porovnávány rozměrové změny a různé typy chlazení. Vždy pozvolné chlazení v pecích a rychlé chlazení na vzduchu či ve vodě.



Obr. 30 : Vliv vodního chlazení na změnu rozměrů receptur CSM1/G2 a CPM1/G2

Změny rozměrů korespondují s předchozími výsledky a zjištěními, kdy byla prokázána větší rozměrová stálost receptur na bázi agloporitu. Lze se domnívat, že frakce agloporitu 0-1 mm obsahuje mnohem méně pórů, než je tomu v případě frakce 1-2 mm, což je dáno výrobními podmínkami tohoto umělého kameniva, kdy se v jemných podílech nachází mnohdy i nedopalky a velmi jemně drcené částice, kdežto frakce 1-2 obsa-

huje mnohem kvalitnější pórovité částice. Zajímavý je fakt, že dochází k největším rozměrovým změnám při expoziční teplotě 800 °C.



Obr. 31 : Vliv vzduchového chlazení na změnu rozměrů receptur CSM1/G2 a CPM1/G2

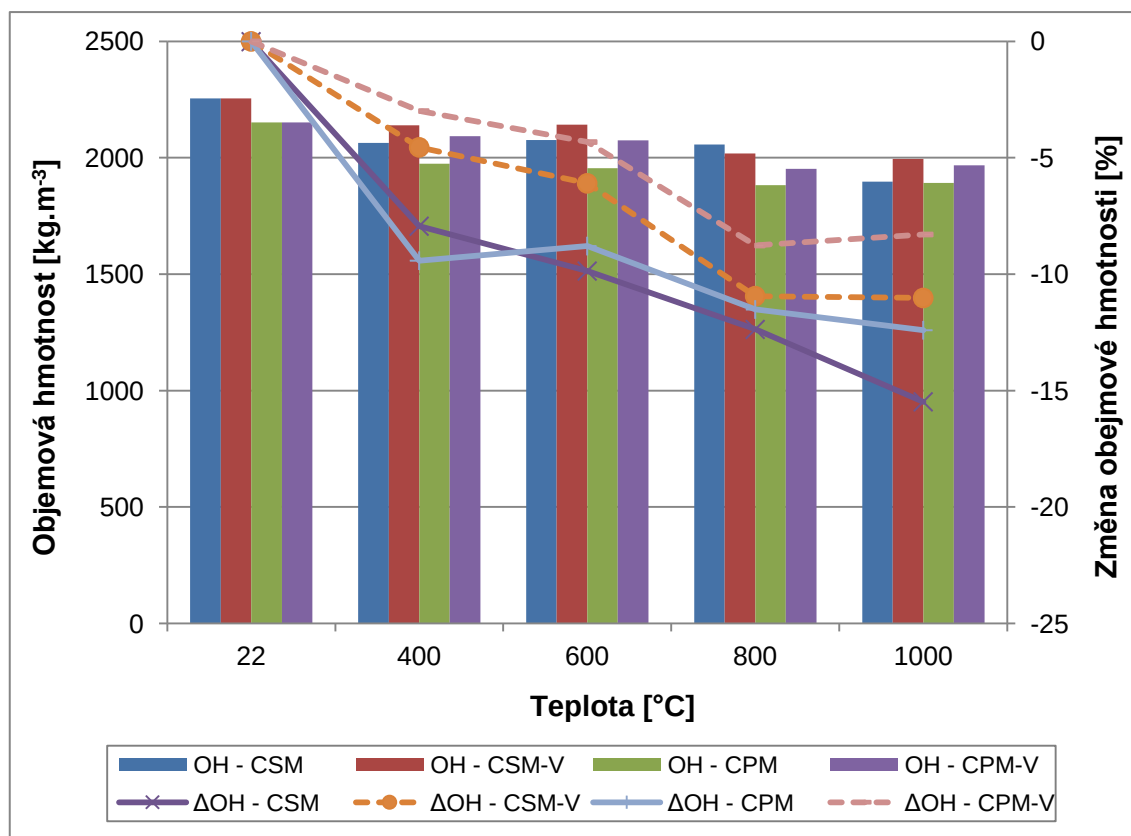
Při komparaci vlivu rychlého chlazení, lze konstatovat, že při teplotním šoku těles vzduchem dochází k mírně nižším změnám při teplotách do 600 °C. Výrazný rozdíl byl zpozorován v případě křivek Δb , resp. Δh u receptury CPM1/G2, kde se jednalo i diametrálně rozdílný průběh. Při chlazení vodou došlo k smrštění výšky do cca -1,4 % a naopak při rychlém chlazení vzduchem byla zaznamenána expanze o velikosti cca 1,8 %. Příčinu by bylo vhodné ověřit v případném navazujícím výzkumu zabývajícím se mikrostrukturou a jejích změn zkoumaných malt. V porovnání s recepturami obsahujícími agloporit frakce 0-1 mm, které se vyznačovaly změnami rozměrů do 2,6 %, v případě receptury obsahující větší frakci 1-2 mm docházelo ke změnám do 1,8 %.

7.6.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost malt je závislá na druhu a množství použitého kameniva jak v čerstvém, tak i ztvrdlém stavu. Malty s obsahem kameniva amfibolit frakce 0-2 mm, tj. receptura CSM a CPM vykazují výrazně vyšší objemové hmotnosti oproti maltám

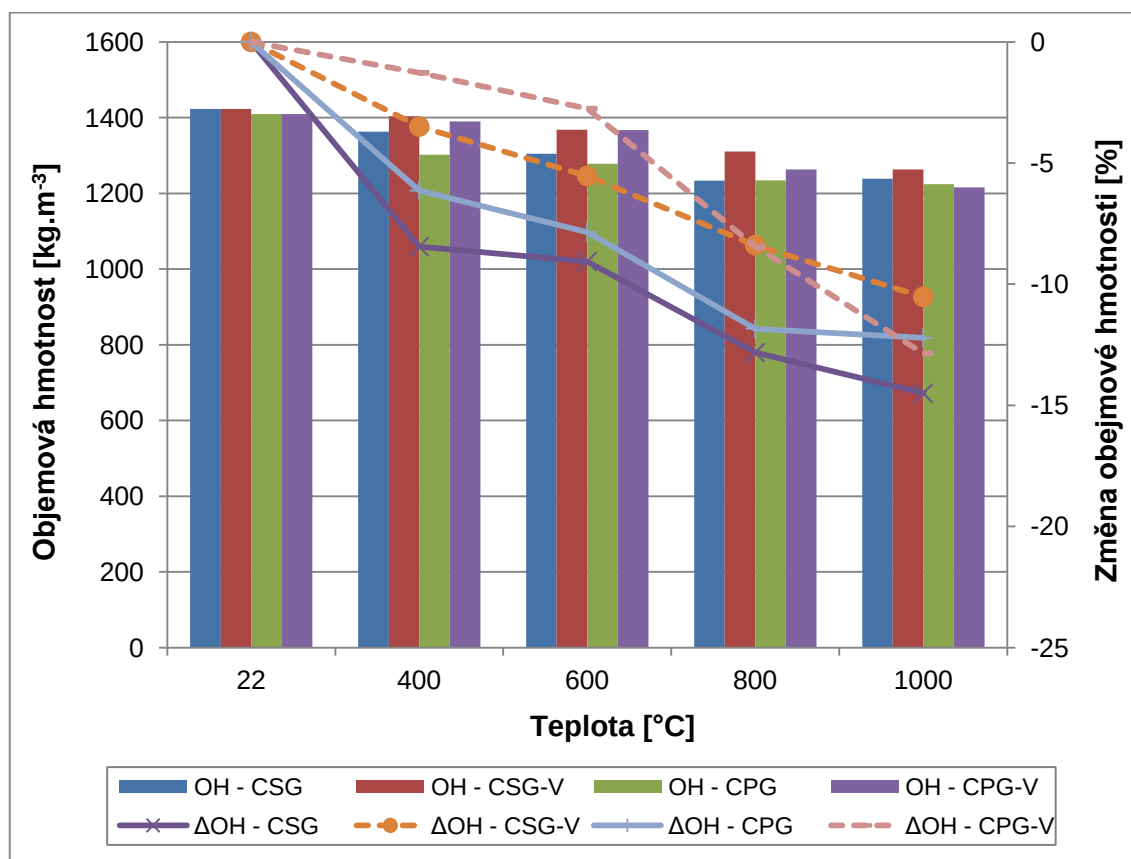
CSG a CPG s plnivem agloporit frakce 0-2 mm. Malty se vzájemnou kombinací kameniv amfibolit a agloporit v poměru 1:1, vykazují menší rozdíl OH. Z grafických výstupů (viz Obr. 32 až Obr. 35) je patrné, že nepatrně vyšší OH vykazují malty CSG1/M2 a CPG1/M2. Zajímavý je také rozdíl OH u malt se stejným plnivem, ale jinou příměsí. Téměř ve všech případech vychází mírně lépe z pohledu poklesů OH malty s příměsí vysokoteplotního popílku. Varianta rychlého chlazení vzduchem byla opět aplikována pouze v případě receptur obsahujících směs kameniva.

Na grafu níže (viz Obr. 32) jsou znázorněny OH malt CSM a CPM při teplotním zatížení až do 1000 °C a porovnány různé typy chlazení. V grafu je také znázorněn pokles OH oproti stavu při teplotě 22 °C. Je patrný nižší pokles OH při vodním chlazení oproti pozvolnému chlazení v pecích. Důvodem je patrně, že při pozvolném chlazení se dále rozkládá matrice. Z grafu je zřejmé, že CPM vykazuje nižší pokles OH téměř při všech teplotách oproti CSM.



Obr. 32 : Porovnání OH receptur CSM a CPM

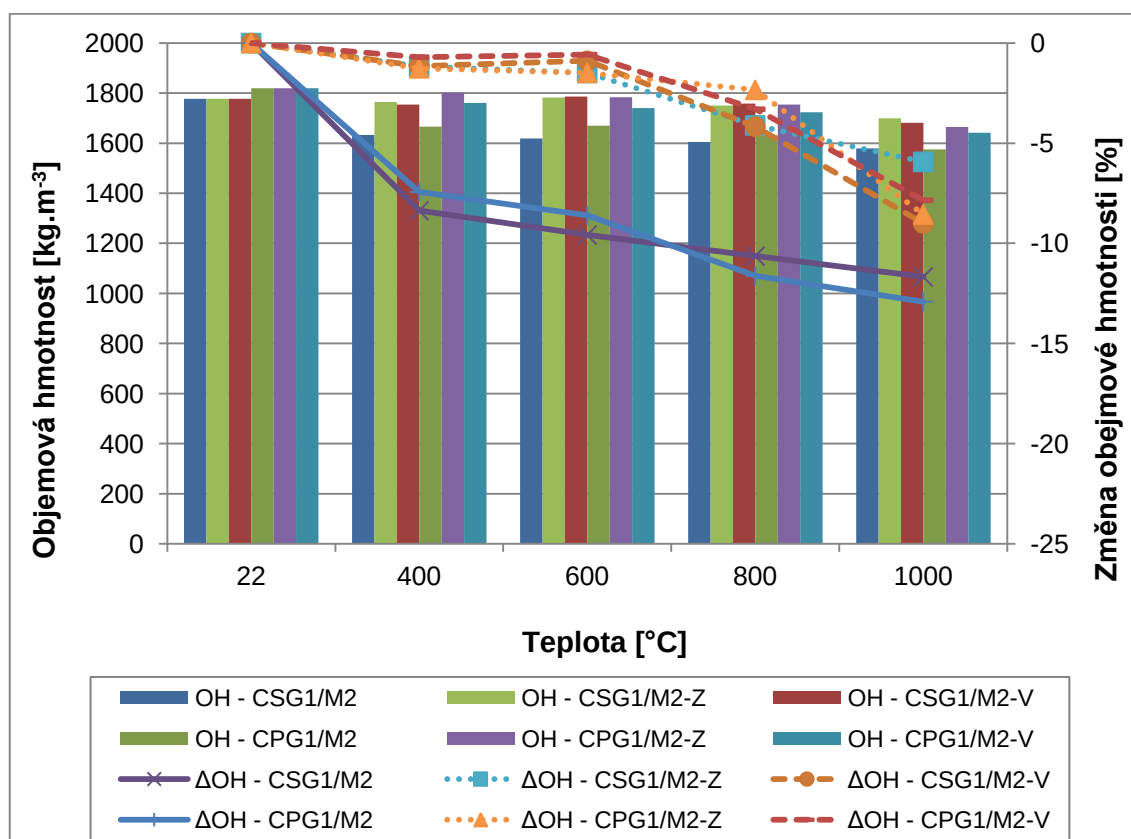
Následující graf (viz Obr. 33) uvádí průběh OH u směsí CSG a CPG. V grafu jsou porovnávány dva typy chlazení, vodní chlazení a pozvolné v pecích. Opět jsou tělesa zatěžována až do teploty 1000 °C. Znázorněn je procentuální pokles OH. Nižší pokles OH vykazují tělesa chlazená vodou, než tělesa chlazená pozvolně v pecích. Z grafu je patrné, že téměř ve všech případech příměs popílku vykazuje nižší pokles OH.



Obr. 33 : Porovnání OH receptur CSG a CPG

Na grafu níže (viz Obr. 34) jsou zobrazeny OH malt CSG1/M2 a CPG1/M2. Teplotní zatížení až do 1000 °C. Porovnávány jsou různé typy chlazení. U těchto směsí je porovnáváno pozvolné chlazení v pecích, chlazení na vzduchu a chlazení vodou. V grafu je znázorněn procentuální pokles OH po teplotním zatížení. Nejvýraznějším poklesům se dostává u těles chlazených pozvolně v pecích. Důvodem je pravděpodobně již zmíněný další rozklad matrice. K výraznějšímu poklesu OH u vzduchového a vodního chlazení dochází při teplotách 800 a 1000 °C. Jak je patrné z dosažených výsledků

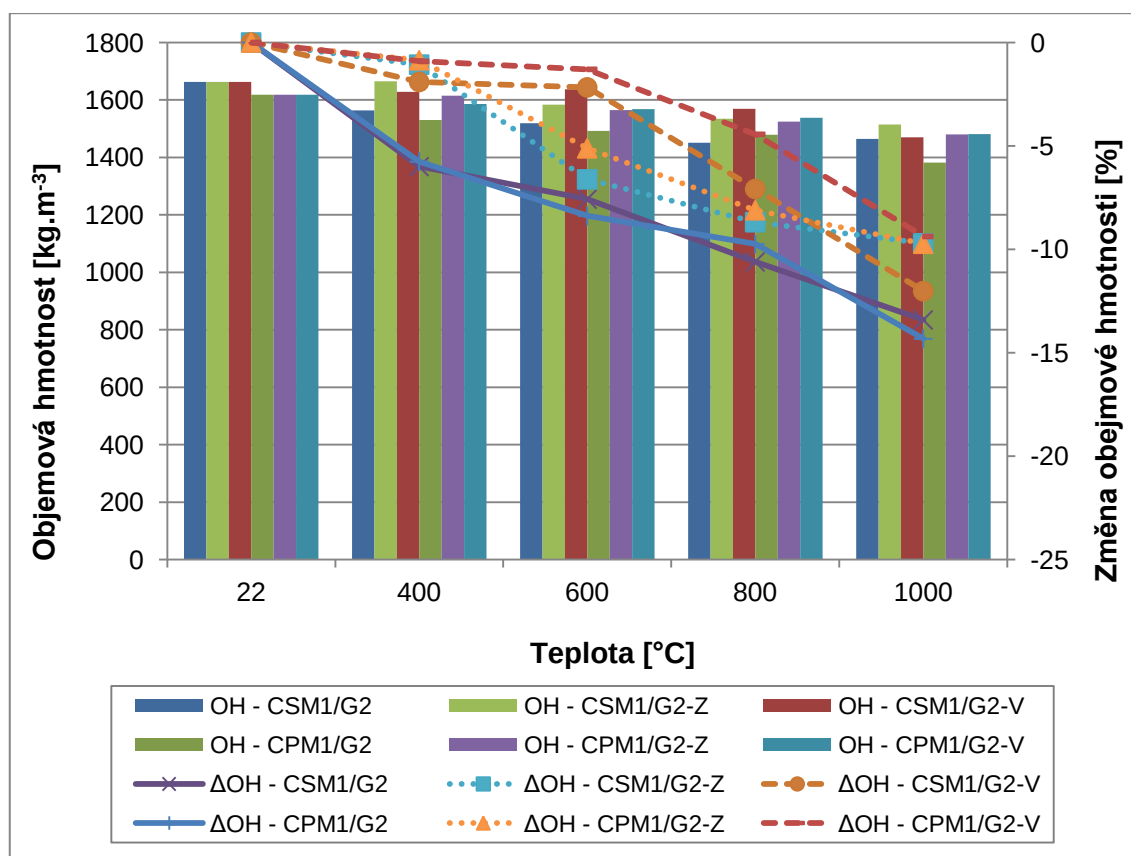
průběh šokového chlazení vodou a vzduchem je při porovnání trendů příslušných křivek obdobný, kdy při teplotách do 600 °C dochází pouze k nepatrným poklesům OH, tj. v řádu do cca 2 %. Zajímavé je zjištění, kdy v případě pozvolného chlazení do teploty 600 °C se jeví jako mírně lépe tepelně odolná malta na bázi směsného pojiva obsahujícího popílek a při expoziční teplotě 800 °C a 1000 °C dochází k menším úbytkům objemové hmotnosti v případě receptur se struskou.



Obr. 34 : OH receptur CSG1/M2 a CPG1/M2

V grafu níže (viz Obr. 35) jsou zobrazeny výstupy OH malt CSM1/G2 a CPM1/G2 po teplotním zatížení až do 1000 °C. Rovněž jsou porovnávány tři různé typy chlazení. Jako u předešlé směsi se jedná o pozvolné chlazení v pecích, o chlazení na vzduchu a vodní chlazení. V grafu jsou znázorněny procentuelní úbytky OH po teplotním zatížení, z nichž vyplývá, že elektrárenský popílek jako příměs dosahuje přibližně srovnatelných výsledků poklesu OH po teplotním zatížení než malty s vysokopecní struskou, kdy do-

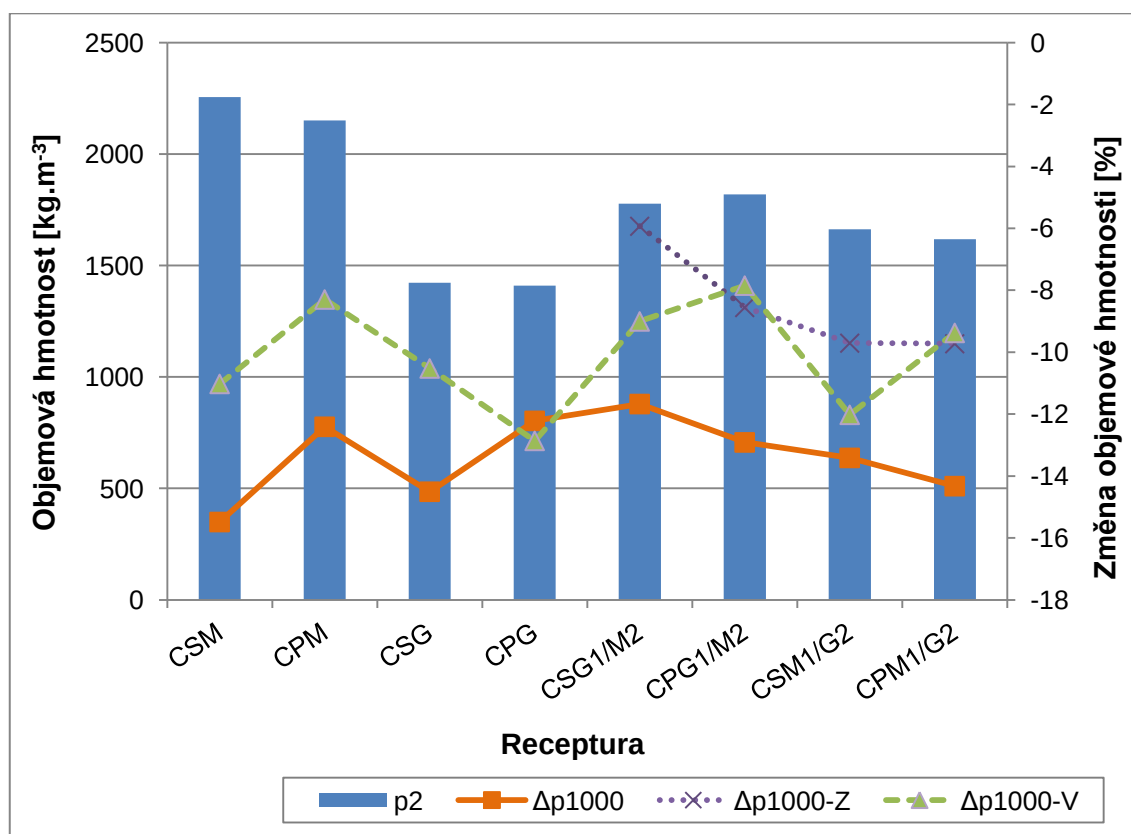
cháží pouze k nepatrným odchylkám v řádu 1-2 %. Trend křivek poklesů na předchozím a následujícím grafu (viz *Obr. 34* a *Obr. 35*) poukazuje na výrazné rozdíly vlivu chladících podmínek, přičemž receptura CS(P)G1/M2 se vyznačuje větší citlivostí k režimu chlazení, kdežto CS(P)M1/G2 je charakterizována více podobnými průběhy úbytků OH při pozvolném i šokovém chlazení. Ovšem při porovnání pouze dvou typů rychlého chlazení se jedná o opačný jev, kdy byly zaznamenány větší difference v případě CS(P)M1/G2, kde při šokovém chlazení vzduchem, zejm. při vystavení malt teplotám 600 a 800 °C dochází k výraznějším poklesům, než u hmot chlazených ve ponoření do vody.



Obr. 35 : OH receptur CSM1/G2 a CPM1/G2

Níže uvedený graf (viz *Obr. 36*) zobrazuje OH všech navržených receptur malt bez teplotního zatížení při teplotě 22 °C a dále pokles vlivu rozdílného typu chlazení na stálost OH při teplotě 1000 °C. Vliv na objemovou hmotnost po teplotním zatížení mají kromě samotného složení malt i různé typy chlazení. Z výstupů dosažených hodnot lze

vyvodit největší pokles OH při pozvolném chlazení v pecích. Tento pokles OH ovlivňuje dále se rozkládající matrice malty při pozvolném chlazení v pecích s pomalu klesající teplotou 1 °C/min. Proto jsou při rychlém chlazení vodou či vzduchem zaznamenány vyšší objemové hmotnosti.



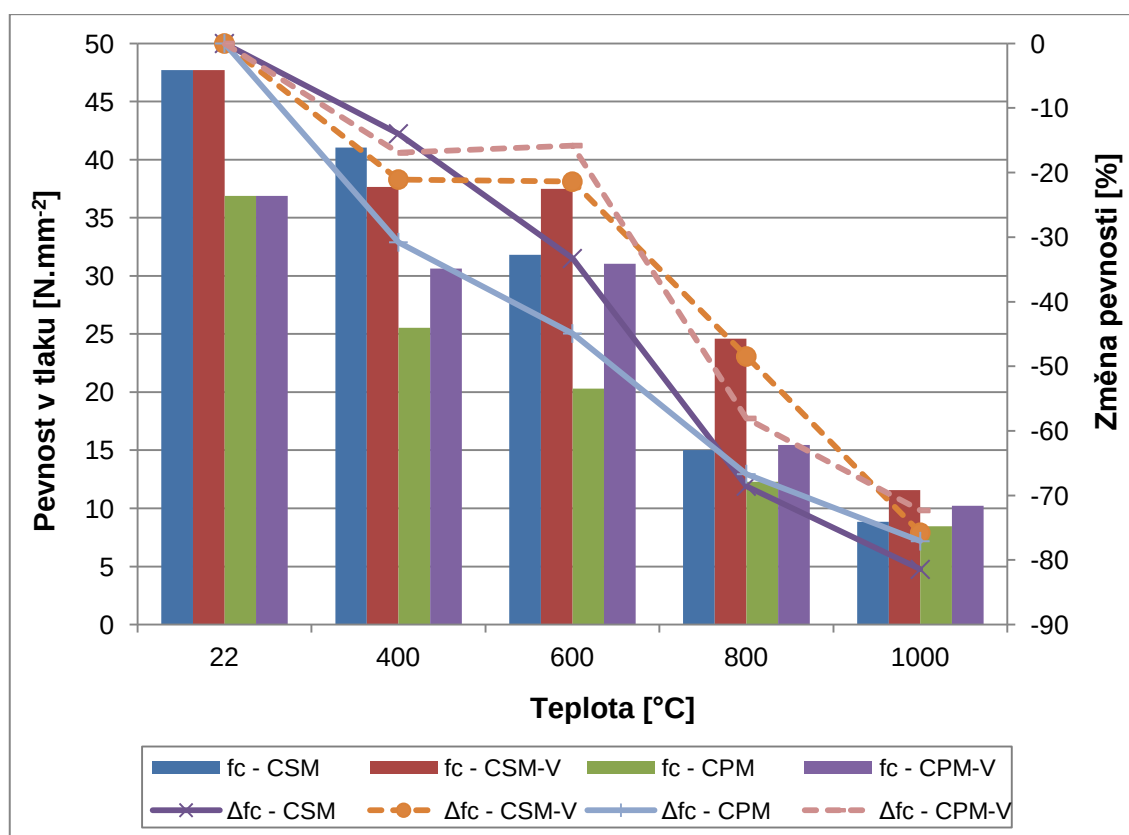
Obr. 36 : OH porovnání všech receptur

Maximální pokles objemových hmotností při teplotě 1000 °C se pohyboval u všech receptur cca do 16 % v závislosti na použitém chlazení těles. Jedním z nejnižších poklesů OH se vyznačují malty CSG1/M2 a CPG1/M2 cca do 13 %, resp. 8 % (pozvolné, resp. vodní chlazení). Zcela nejlépe lze hodnotit recepturu CSG1/M2, ovšem pouze pro podmínky šokového chlazení vzduchem.

7.6.3 Pevnost v tlaku

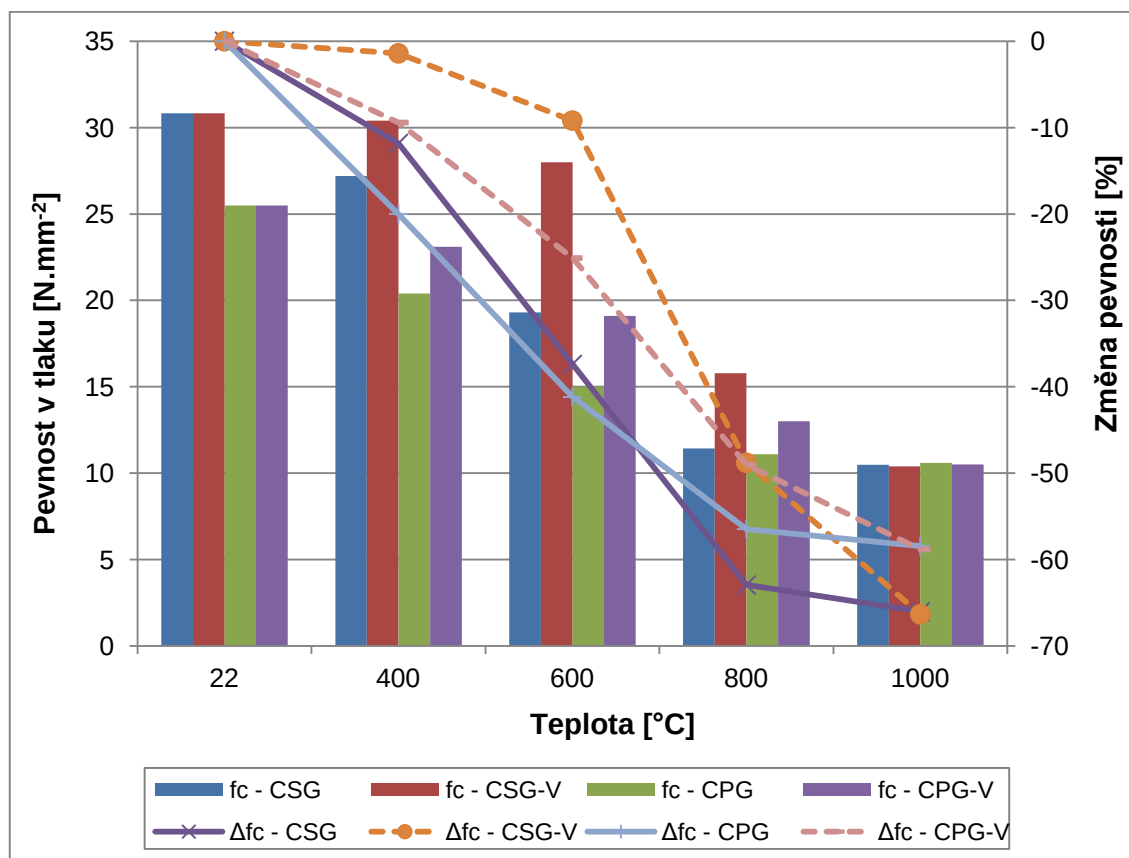
V této části jsou uvedeny výsledky dosažené při zkoušení pevnosti v tlaku. Požadavkem při návrhu správkových hmot, bylo navrhnout správkovou maltu, aby splňovala požadavky alespoň třídy R3 či vyšší, tj. se statickou funkcí. Za vytyčení stojí zejména pevnosti receptury CSM, které dosahovaly téměř 48 MPa. Pevností nad 45 MPa je splněn požadavek pro zařazení do třídy R4 se statickou funkcí. Všechny ostatní navržené receptury splňují požadavek třídy R3.

V grafu níže (viz Obr. 37) jsou znázorněny výstupy pevností a průběhy poklesů pevností po teplotním zatížení. Jedná se o receptury CSM a CPM. Tyto receptury obsahují hutné kamenivo amfibolit. Bez teplotního zatížení, přispívá toto hutné kamenivo k vyšší pevnosti v tlaku, což je žádaný efekt zejména při požadavku na malty se statickou funkcí. Hutné kamenivo má obecně vyšší tepelnou vodivost oproti pórovitému kamenivu. Při prudkém nárůstu teploty mohou nastat náhlé teplotní šoky a objemové změny ve struktuře malty. To může být příčinou poklesu pevností v tlaku až o 82 % při teplotním zatížení 1000 °C u receptury CSM a 77 % u receptury CPM.



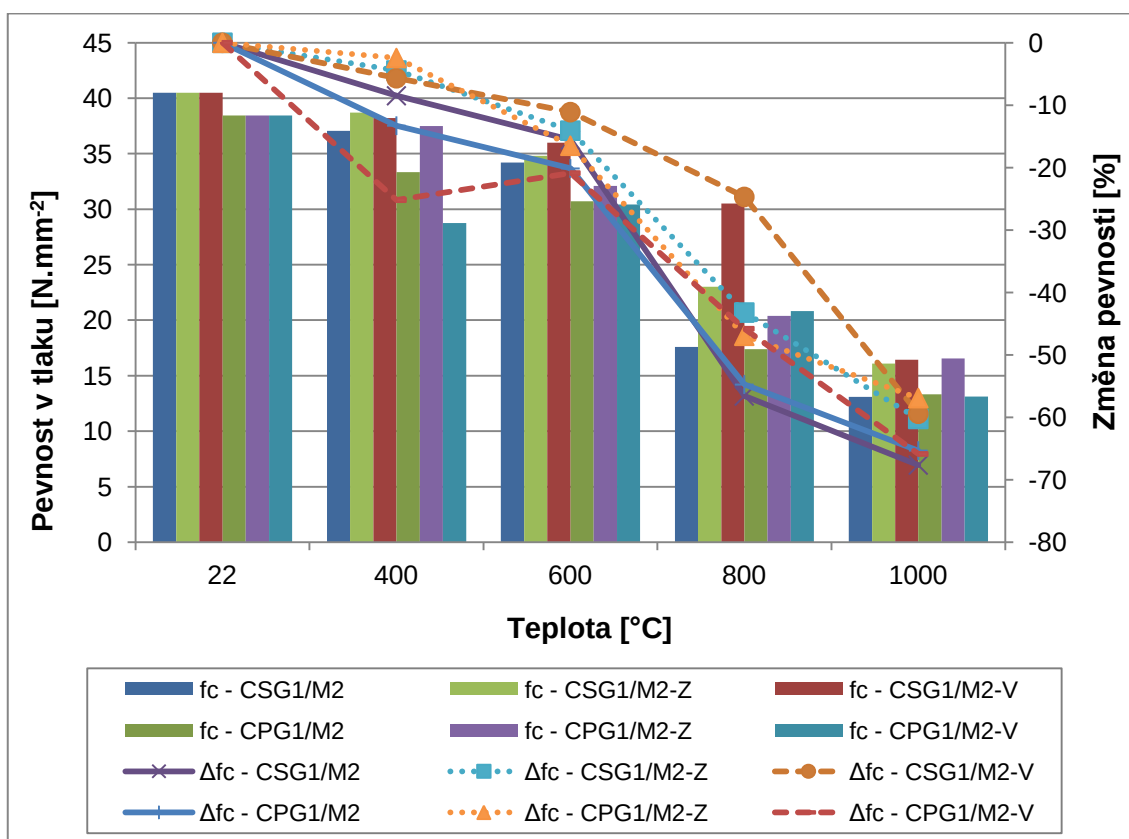
Obr. 37 : Pevnost v tlaku receptur CSM a CPM

Na následujícím grafu (viz Obr. 38) jsou uvedeny výstupy pevností v tlaku receptur CSG a CPG. Jedná se o malty s pórovitým kamenivem. Dle předpokladu dosahují nižších pevností než receptury CSM a CPM. Pórovité kamenivo má oproti hutnému kamenivu nižší tepelnou vodivost a rozdílný modul pružnosti, lze se domnívat, že je z hlediska objemových změn vlivem teploty více „poddajné“, čímž bylo pravděpodobně dosaženo nižších procentuálních úbytků pevností v tlaku ve srovnání s recepturami obsahujícími jen amfibolit. Při teplotě 1000 °C bylo dosaženo poklesu pevností o 67 % u receptury CSG a 58 % u receptury CPG. Rozdíl poklesů pevností u receptur s hutným kamenivem a pórovitým kamenivem (CSM a CSG) je tedy cca 15 %. U receptur CPM a CPG rozdíl činil dokonce přibližně 19 %. Lze předpokládat, že kombinací kameniv je možno dosáhnout kompromisu mezi pevností a úbytkem pevností po teplotním zatížení. Zajímavý je průběh úbytku pevnosti receptury CSG-V u expozičních teplot 400 a 600 °C, kdy dochází k poklesu f_c pouze do 10 %



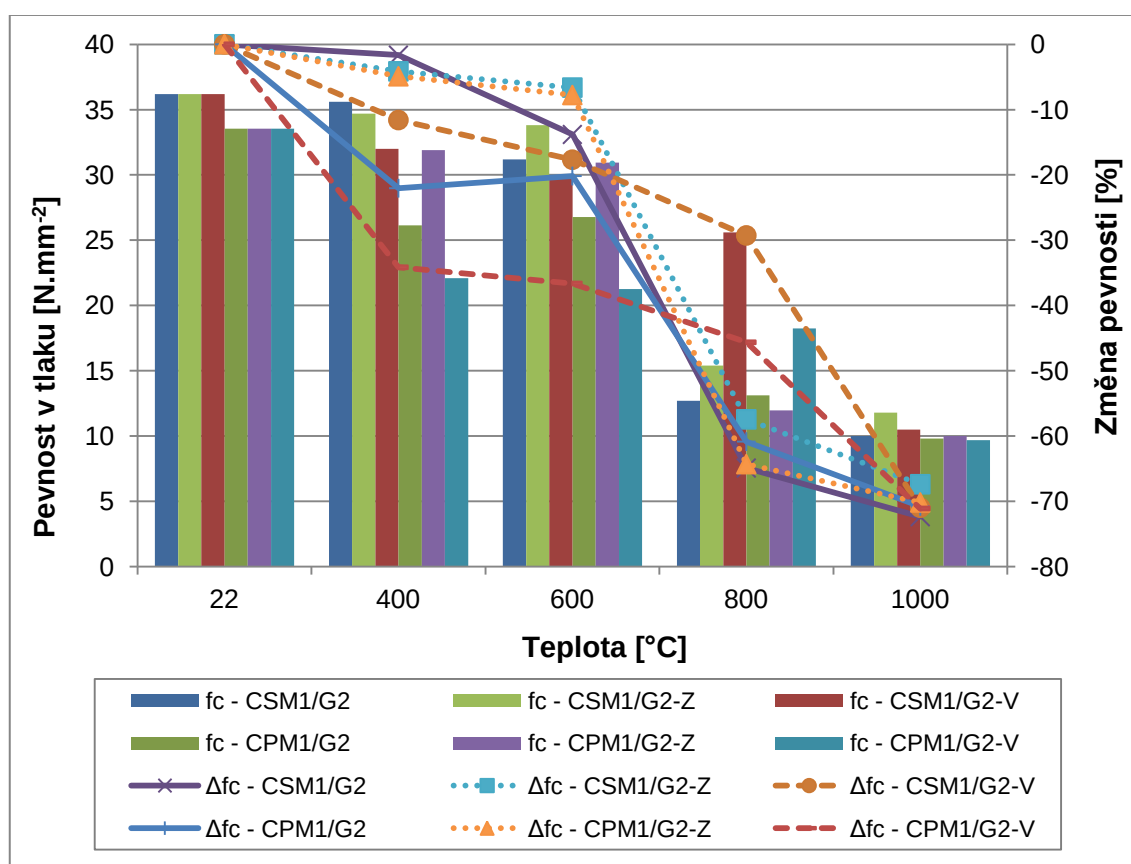
Obr. 38 : Pevnost v tlaku receptur CSG a CPG

V následujícím grafu (viz Obr. 39) jsou vyobrazeny výstupy pevností v tlaku vč. křivek charakterizujících tři různé typy chlazení. Receptury CSG1/M2 a CPG1/M2 tvoří kombinaci hutného (frakce 1-2 mm) a pórovitého kameniva (frakce 0-1 mm) v poměru 1:1. Pevnosti i poklesy pevností se pohybují mezi hodnotami naměřenými u směsí s hutným a pórovitým kamenivem. Nejvyššího poklesu pevností při 1000 °C dosahuje malta se struskou a pomalým chlazením v pecích, téměř 68 %. Rozdíly ve vlivu chlazení nejsou výrazné. Velmi dobrý výsledek lze spatřit v případě receptury CSG1/M2-V, kdy při expozici o teplotě 800 °C a následném vodním chlazení došlo k poklesu pevnosti v tlaku pouze cca do 25 %. V případě expozice v prostředí o teplotě 1000 °C a následného ponoření do vody se jednalo o pevnostní úbytek přibližně 60 %.



Obr. 39 : Pevnost v tlaku receptur CSG1/M2 a CPG1/M2

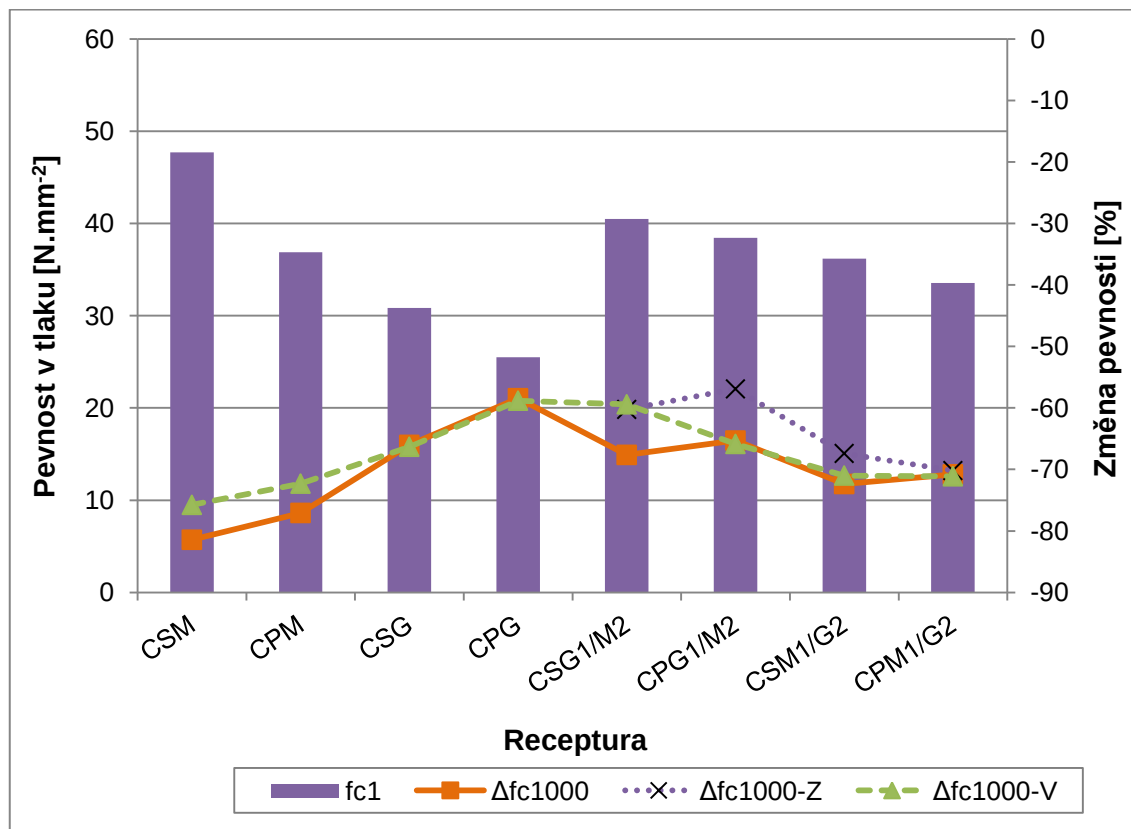
Porovnání výsledků pevností v tlaku u receptur CSM1/G2 a CPM1/G2 je zaznamenáno v níže uvedeném grafu (viz Obr. 40). Opět nejvyšších procentuelních poklesů pevností při zatížení 1000 °C dosáhla malta se struskou a pomalým chlazením v pecích. V porovnání s předchozími recepturami (viz Obr. 37 až Obr. 39) lze charakterizovat průběhy křivek úbytků pevností jako s největší variabilitou, kdy nelze ani přibližně konstatovat, který z použitých způsobů chlazení je mírnější či agresivnější bez podrobného rozebrání jednotlivých teplotních intervalů.



Obr. 40 : Pevnost v tlaku receptur CSM1/G2 a CPM1/G2

V souhrnném grafu níže (viz Obr. 41) jsou zobrazeny jednotlivé pevnosti všech receptur při teplotě 22 °C a znázorněny poklesy pozvolného chlazení v pecích, vzduchového a vodního chlazení při teplotě 1000 °C. Všechny malty v nezatíženém stavu splňují požadavek třídy R3 se statickou funkcí pevnost v tlaku vyšší jak 25 MPa.

Zajímavé je, že při teplotách do 600 °C při pozvolném chlazení v pecích vykazují lepší výsledky receptury se struskou a při teplotách 800 a 1000 °C vykazují lepší výsledky receptury s popílkem. Při chlazení na vzduchu nejsou pozorovány výraznější změny. Pravděpodobně dochází ke změnám mikrostruktury vlivem použitých příměsí. Vliv příměsí, zejména popílku by bylo vhodné ověřit dlouhodobějším testováním, kdy by mohlo více popílku zreagovat v matrici.



Obr. 41 : Souhrnné pevnosti v tlaku všech receptur při 22 °C

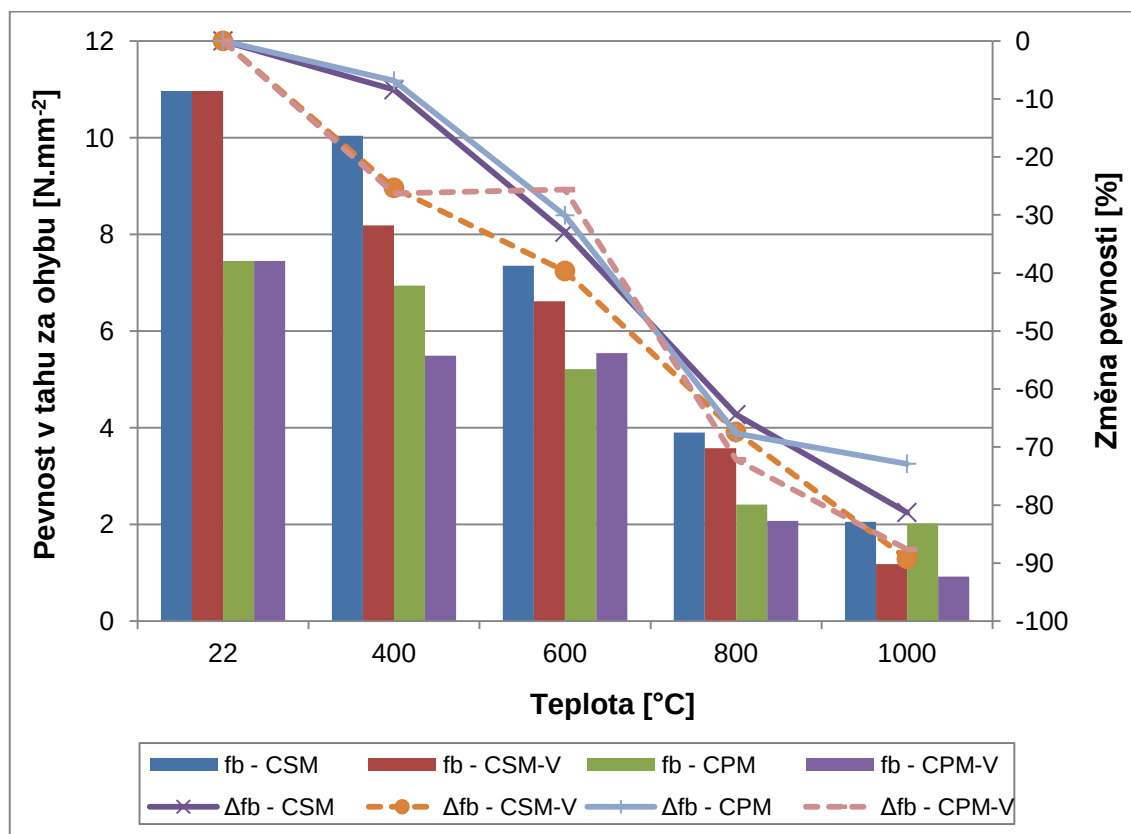
Příčinou nejvyšší změny pevností zejména u směsí chlazených v pecích může být stejně jako v případě objemových hmotností další rozklad matrice. Vlivem kombinací kameniv lze dosáhnout kompromisu mezi pevnostmi a poklesem pevností při tepelném zatížení.

Při vystavení malt teplotě 1000°C nejsou difference pro různé typy chlazení již tak výrazné a úbytky pevností jsou relativně srovnatelné, zejména v porovnání s objemovými hmotnostmi.

7.6.4 Pevnost v tahu ohybem

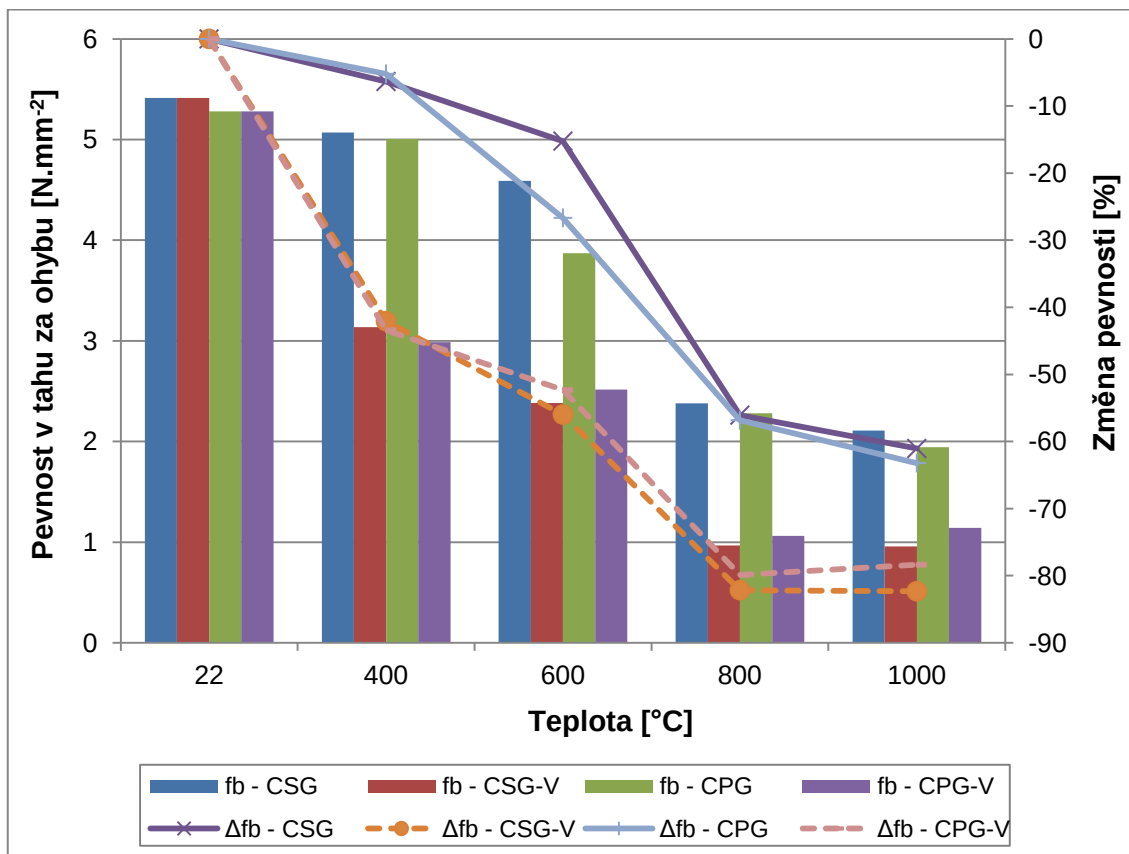
Pevnost v tahu ohybem malt je zaznamenána v grafech níže (viz *Obr. 42 až Obr. 46*). Hodnoty pevností v tahu ohybem tepelně nezatížených jsou poměrně vysoké. Zejména pak u malt CSM, kdy dosahovaly až 11 MPa. Pro zvýšení pevnosti v tahu ohybem se v praxi využívá vyztužení. Přidáním vláken lze zvýšit pevnost v tahu ohybem, ale především celulózoová vlákna zabraňují vzniku smršťovacích trhlin při zrání malty. Dále při teplotním zatěžování extrémními teplotami, zabraňují explozivnímu odprýskávání malty a chrání ocelovou výztuž.

V následujícím grafu (viz *Obr. 42*) jsou zobrazeny pevnosti v tahu ohybem u směsí malt CSM a CPM. Znatelný je výrazný pokles pevností v tahu ohybem při teplotním zatížení. Ještě výraznější pokles pevností je u rychlého chlazení vodou. Mírně lépe vychází z pohledu poklesů pevností v tahu ohybem malty směs s popínkem.



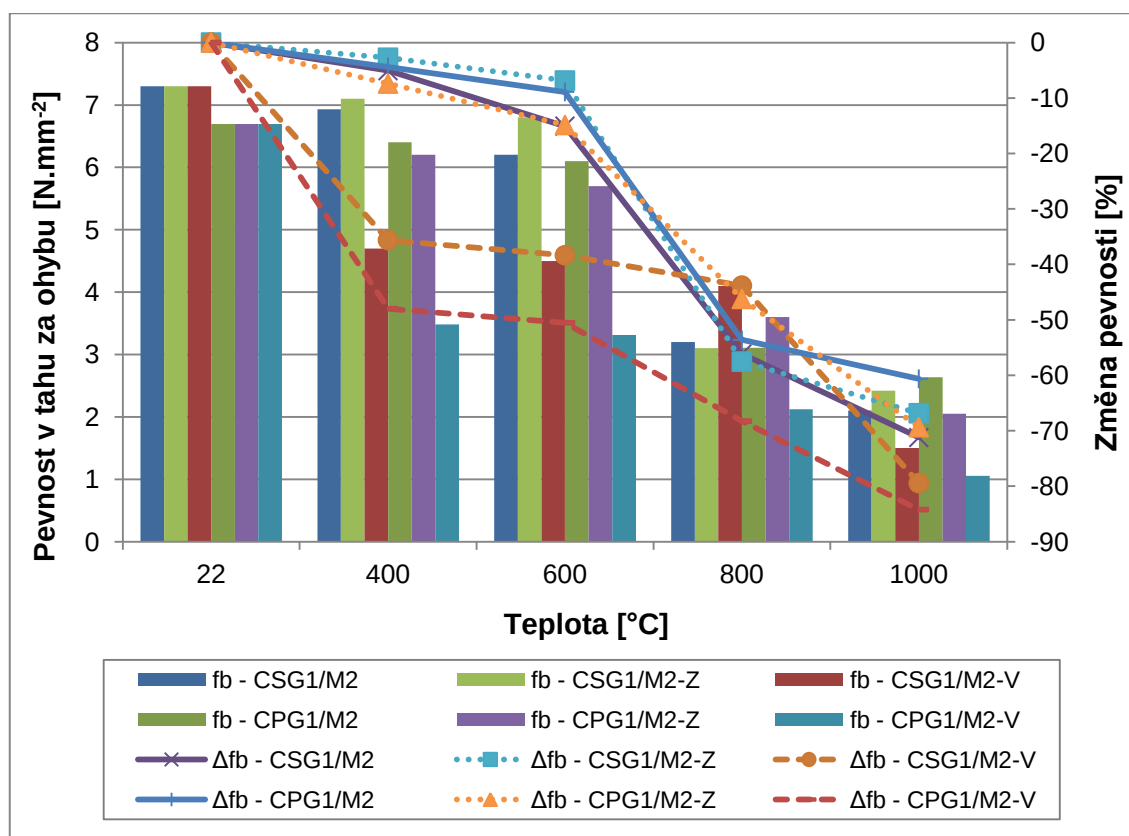
Obr. 42 : Pevnost v tahu za ohybu receptur CSM a CPM

Graf níže (viz Obr. 43) porovnává směsi malt CSG a CPG pro dva typy chlazení. U těchto typů malt došlo rapidnímu úpadku pevností v tahu ohybem po šokovém chlazení vodou v porovnání s pozvolným chlazením v pecích, kdy se jednalo o pokles pevnosti o cca 80 %, přičemž rozdíly mezi recepturami s popílkem a struskou jsou nevýrazné. Nejstrmější pokles pevností byl zaznamenán při zatížení expoziční teplotou 400 °C.



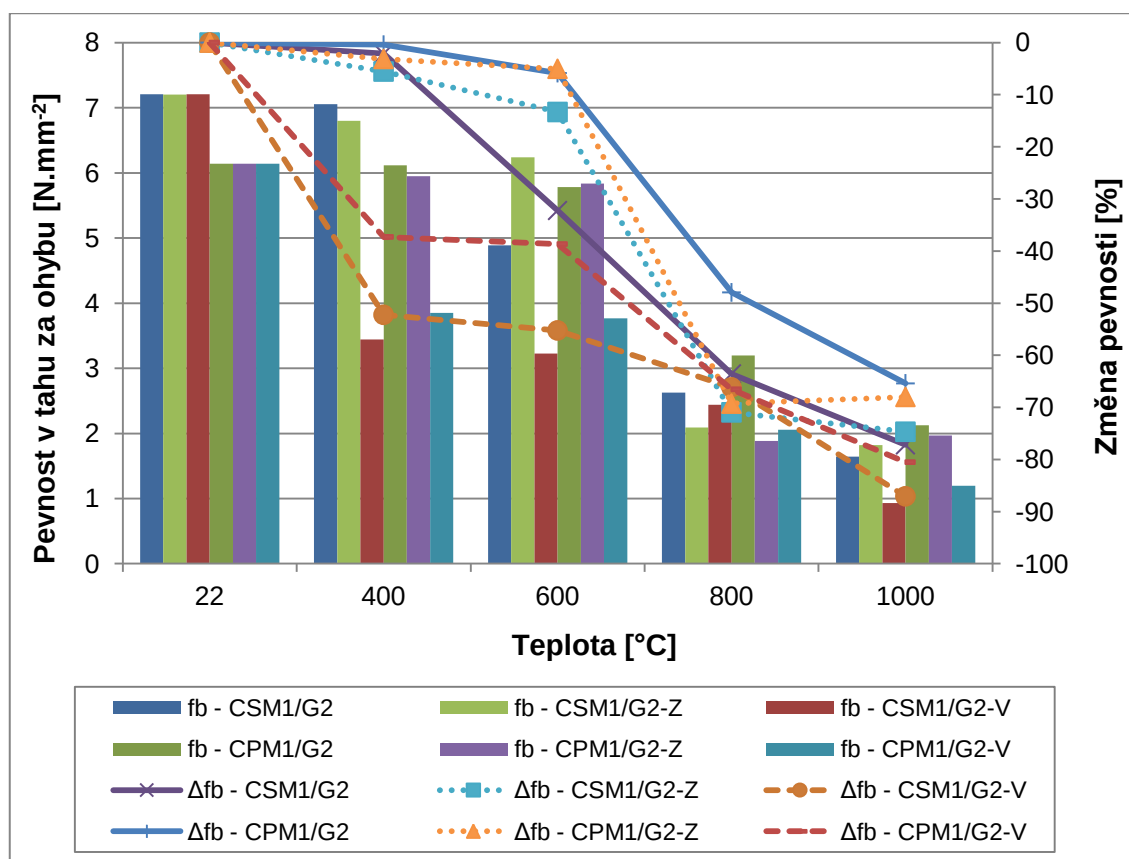
Obr. 43 : Pevnost v tahu za ohybu receptur CSG a CPG

V následujícím grafu (viz Obr. 44) uvedeném jsou zobrazeny výstupy dosažených výsledků ohybových pevností receptur CSG1/M2 a CPG1/M2. Porovnávány jsou tři typy chlazení, pozvolné v pecích, chlazení na vzduchu a rychlé chlazení vodou. Z grafu vyplývá opět negativní vliv rychlého chlazení vodou na ohybové pevnosti. U těchto směsí se naopak vychází mírně lépe záměsí s vysokopecní struskou oproti popílkem. Zajímavé je zjištění, že šokové chlazení vzduchem nemá na výsledné pevnosti výrazně negativní vliv a průběhy křivek poklesů jsou srovnatelné s pozvolným chlazením.



Obr. 44 : Pevnost v tahu za ohybu receptur CSG1/M2 a CPG1/M2

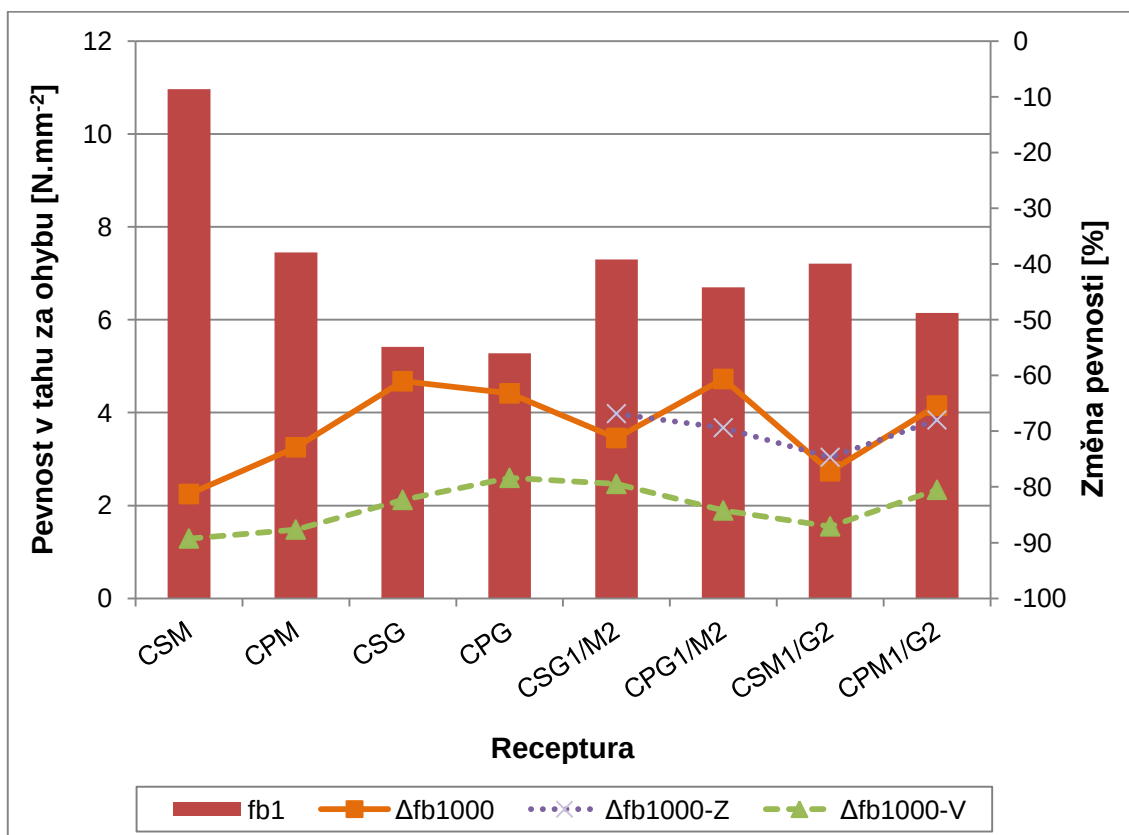
Výsledky ohybových pevností u směsí CSG1/M2 a CPG1/M2 jsou znázorněny v grafu níže (viz Obr. 45). Je zde opět patrný zejména pokles u těles rychle chlazených vodou. Nejvýraznější a nejvíce strmý pokles pevnosti v ohybu byl zaznamenán u receptury obsahující strusku a to při vodním chlazení, kdy po expozici malty prostředí o teplotě 400 °C lze pozorovat pokles cca -52 %, přičemž dále pevnosti klesají již spíše pozvolně na hodnotu cca -87 %. Jako lépe odolnou lze v tomto případě hodnotit recepturu s popínkem se zajímavým zjištěním, kdy popílek se projevil pozitivním vlivem při vystavení těles malt teplotě 1000 °C a to v případě všech tří použitých typů chlazení. Jak je patrné z křivek poklesů, tak průběh pozvolného chlazení v peci a šokového chlazení vzduchem je velmi podobný, ovšem s výjimkou teploty 800 °C, kdy došlo ke značnějšímu poklesu pevností při náhlém chlazení na vzduchu.



Obr. 45 : Pevnost v tahu za ohybu receptorů CSM1/G2 a CPM1/G2

V souhrnném grafu (viz Obr. 46) jsou zobrazeny ohybové pevnosti při teplotě 22 °C a znázorněny poklesy ohybových pevností různých typů chlazení při teplotě 1000 °C. Vodním chlazením poklesly pevnosti o 80 - 90 %. V porovnání se zjištěními týkajícími se pevnosti v tlaku se tedy jedná o poměrně výrazný rozdíl. S výjimkou receptorů CSG a CPG dochází ve všech případech při zatížení teplotou 1000 °C k větším poklesům u malt s obsahem vysokopecní strusky. Rovněž lze konstatovat, že byl jednoznačně prokázán pozitivní vliv pórovitého kameniva na pevnost v ohybu při expozici malt v prostředí o extrémních teplotách. Nejvíce patrný je tento rozdíl při porovnání receptorů na bázi pouze amfibolitu, resp. popílkového agloporitu. Receptura CSM se po expozici při 1000 °C vyznačuje poklesem pevnosti v ohybu cca -81 %, kdežto u receptury CSG lze pozorovat snížení pevnosti v tahu za ohybu o cca -61 %. Toto se ovšem týká pozvolného chlazení v peci. Reálné podmínky hašení požáru lépe vystihuje rychlé chlazení vodou. V případě právě šokového působení vody se rozdíly mezi poklesy pevností

vlivem použití hutného či pórovitého kameniva poněkud snižují (CSM – cca 89 % a CSG – cca 82 %).



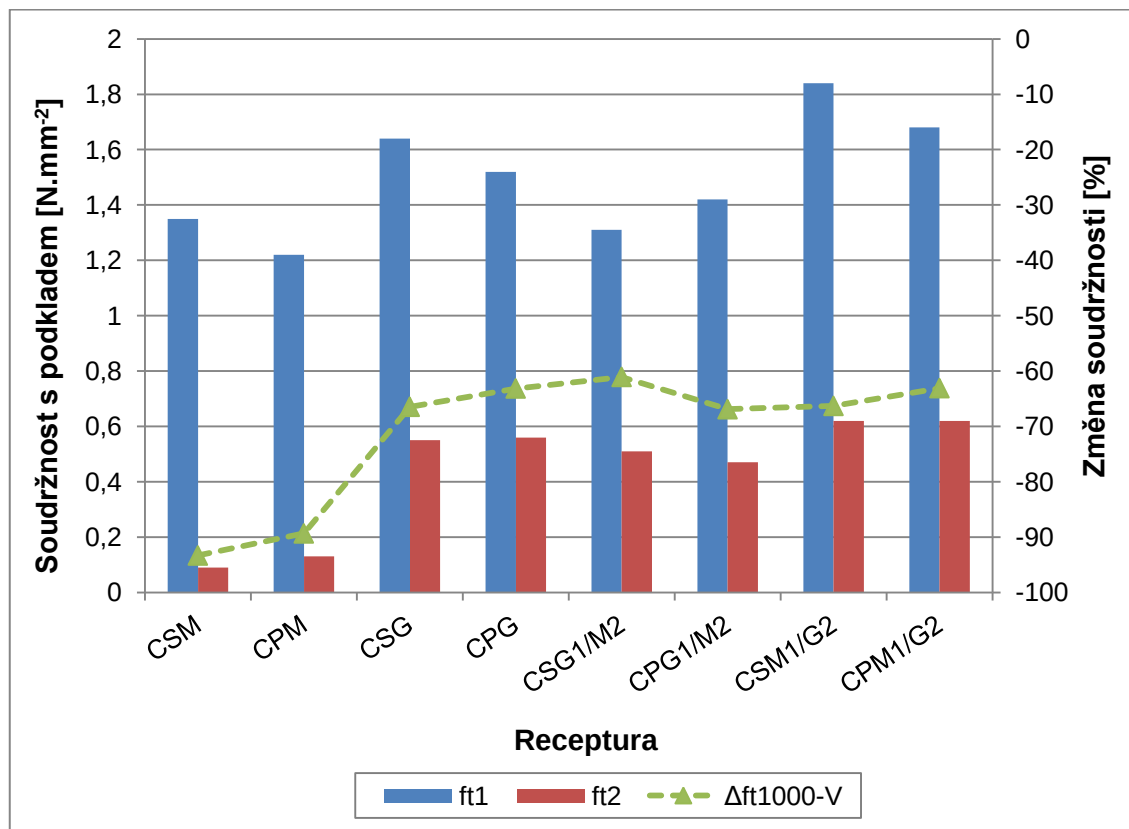
Obr. 46 : Souhrnné vyhodnocení pevností v tahu za ohybu všech receptur při teplotě 22 °C

7.6.5 Soudržnost s podkladem

Soudržnost s podkladem je velice důležitou vlastností správkových hmot. Soudržnost lze ovlivnit výrazně příměsemi, polymerními modifikátory. Do značné míry lze přídržnost malty ovlivnit i přípravou podkladu, který musí být očištěný od nesoudržných součástí a mírně navlhčen, aby neodebíral vodu potřebnou k hydrataci malty. V grafu níže (viz Obr. 47) jsou zobrazeny přídržnosti všech receptur v nezatíženém i teplotně zatíženém stavu na teplotu 1000 °C.

Soudržnost u malt se statickou funkcí by měla vykazovat hodnoty soudržnosti s podkladem vyšší než 1,5 MPa. Malty s obsahem amfibolitu CSM a CPM vykazují mírně nižší hodnoty. Příčinou nižších hodnot soudržnosti může být při nanášení vyšší

lepivost spíše k zednické lžici než k podkladu. Při nanášení k podkladu se tyto malty mírně trhaly. Směsi CSG1/M2 a CPG1/M2 také vykazovaly mírně nižší hodnoty než je požadovaných $\geq 1,5$ MPa. Konkrétně 1,32 a 1,42 MPa. Zvýšení soudržnosti lze dosáhnout např. zvýšením dávky polymerní přísady nebo zvýšením množství příměsí. Pokles soudržnosti po teplotním zatížení na 1000 °C dosahoval cca 60 - 70 %. Výjimkou jsou směsi CSM a CPM, kde soudržnost poklesla až o 93 a 89 %.



Obr. 47 : Grafické znázornění hodnot soudržností s podkladem před a po teplotním zatížení

Z hlediska použitelnosti v praxi se na základě dosažených výsledků soudržnosti jeví receptury CSG, CSM1/G2 a CPM1/G2. V případě CPG by muselo být mírně zkorigováno složení malty, příp. použit adhezní můstek. Jako zcela nevhodné lze s ohledem na teplotní odolnost shledat receptury CSM a CPM. Naopak nejlépe teplotně odolná se jeví receptura CSG1/M2.

8 Diskuse výsledků

8.1 Výběr kameniva

Pro výrobu správkových malt byly vybrány 4 směsi kameniva, na kterých byl proveden síťový rozbor dle ČSN EN 933-1. Pro přiblížení se k ideální křivce zrnitosti EM-PA, byly vytvořeny křivky zrnitosti jednotlivých směsí kameniv. Kamenivo je podstatnou složkou správkové malty. Rozdílné vlastnosti a chování kameniva při zatížení extrémními teplotami se projevují na zhotovených tělesech rozdílných receptur. Důležitá je teplota 573 °C, kdy dochází k přeměně křemene z modifikace α na modifikaci β . Tato přeměna je doprovázena objemovými změnami a tím možnou destrukci kompozitu. Ve struktuře malty dochází k pnutí, které má za následek pokles mechanické pevnosti celého kompozitu. Nejvyšší pevnosti vykazovala receptura CSM s amfibolitem, téměř 48 MPa. U této receptury při zatížení 1000 °C ovšem došlo k nejvýraznějšímu poklesu pevností cca o -82 %. Naopak u receptur s agloporitem došlo k nejmenšímu poklesu pevností při zatížení teplotou 1000 °C. U receptury CPG pouze o 63 %, resp. 59 % při vodním chlazení, což lze považovat za velmi dobrý výsledek. Rozdílné poklesy pevností souvisí s tepelnou vodivostí kameniv. Agloporit vykazuje nižší tepelnou vodivost oproti amfibolitu, je tedy méně náchylný k teplotním šokům. Z výstupů testování je patrný pozitivní vliv agloporitu pro malty s odolností vůči vysokým teplotám. Agloporit je vhodný i z pohledu samo-ošetřování, protože při zrání malty postupně uvolňuje vodu. Nevýhodou může být do jisté míry potřeba jeho saturace před mísením složek, což by mohlo však být řešeno přidavkem většího množství vody a delší dobou míchání směsi.

8.2 Vliv složení pojiva

Stanovení množství pojiva bylo testováno na dvou recepturách s rozdílným poměrem mezi pojivem a plnivem. Poměr pojiva ku plnivu 1:2,5 vykazoval jak vyšší náběh pevností, tak i výsledné pevnosti po 28 dnech oproti poměru 1:3. Pevnost celé matrice s ohledem na jemnozrnné plnivo (do 2 mm) je důležitým faktorem pro splnění požadavků pevnostní třídy R3 uvedené v Tab. 1. Pro snížení ceny a ohled na životní prostředí, bylo v pojivové části matrice nahrazeno 35 % cementu popílkem nebo vysokopecní

struskou. Pro zvýšení pevností, zejména u receptur s agloporitem, byla přidána mikrosilika v množství 5 % z hmotnosti cementu.

Z hlediska objemových hmotností lze hodnotit vliv příměsí jako zanedbatelný. Mnohem výrazněji se použití popílku vs. strusky projevilo na pevnostních charakteristikách. V případě všech receptur byla vyšší pevnost v tlaku i tahu za ohybu zaznamenána při použití vysokopecní strusky. Nejmenšími vzájemnými diferencemi pevnosti v tahu za ohybu se vyznačovaly receptury na bázi agloporitu, tj. CSG a CPG a nejvýraznějšími naopak malty s obsahem amfibolitu, tj. CSM a CPM. Kromě receptury CSM, která z hlediska pevnosti v tlaku splňuje požadavek pro třídu R4, lze všechny vyvinuté malty zařadit do třídy R3. Při uvážení soudržnosti s podkladem nebylo u žádné receptury dosaženo minima pro třídu R4. Minimální kritérium 1,5 MPa pro třídu R3 bylo splněno u receptur CSG, CPG, CSM1/G2 a CPM1/G2, kdy v případě receptur obsahujících směs agloporitu a amfibolitu by při úpravě složení či zařazení adhezního můstku mohlo být docíleno i třídy R4. Vyšší soudržností lze charakterizovat receptury s obsahem vysokopecní strusky. Výjimkou je pouze CSG1/M2 a CPG1/M2. Při hodnocení tepelné odolnosti receptur po expozici při 1000 °C lze konstatovat následující:

- u objemových hmotností nelze jednoznačně popsat vliv na teplotní odolnost;
- všechny receptury obsahující popílek se vyznačovaly vyššími reziduálními pevnostmi v tlaku, než tomu bylo u malt na bázi vysokopecní strusky, výjimkou byla receptura CPG1/M2 (při vodním chlazení) a CPM1/G2 (při šokovém chlazením vzduchem);
- kromě receptur obsahujících popílkový agloporit byly zaznamenány lepší teplotní odolnosti s ohledem na pevnost v tahu za ohybu v případě malt s vysokoteplotním popílkem, výjimkou byla pouze receptura CPG (při po-zvolném chlazení) a CPG1/M2 (chlazená šokově vodou a vzduchem);
- v případě soudržnosti s podkladem již nebyly rozdíly vlivem použité aktivní příměsi jako substituční složky cementu tak výrazné, kdy vyjma CPG1/M2 byly zaznamenány mírně vyšší tepelné odolnosti u receptur obsahujících popílek.

8.3 Vliv chlazení těles

Chlazení těles probíhalo v různých prostředích. Prvním typem chlazení je pozvolné v pecích cca 1 °C/min. U vyšších teplot se projevila dále se rozkládající matrice na pokles pevností. U pevností v tlaku se při chlazení vodou se projevil méně negativní vliv na šokové ochlazení zejména u teplot 800 a 1000 °C. Jednoznačně negativní vliv má šokové chlazení vodou zejména na pevnosti v tahu za ohybu, u nichž docházelo k výrazným rozdílům při uvážení chlazení vodou a pozvolně v pecích (až 40 %). Při chlazení na vzduchu tělesa vykazují mírně nižší pokles pevností oproti pozvolnému chlazení v pecích a šokovému vodou. V případě pevnosti v tlaku lze konstatovat, že receptury CSM, CPM, CSG a CPM vykazovaly znatelnější pokles tohoto parametru při pozvolném chlazení, což koresponduje se stanovenými objemovými hmotnostmi. Je tedy patrné, že se v tomto případě výrazněji projeví skutečnost, že při klesající teplotě stále dochází k rozkladu matrice, příp. objemovým změnám jednotlivých složek, než negativní šokové působení při prudké změně teplotních podmínek prostředí. U receptur obsahujících směs kameniv, tj. G1/M2, resp. M1/G2 byly závislosti patrné v případě objemové hmotnosti a pevnosti v tahu za ohybu. Chladicí režim šokového působení vzduchu se na těchto výsledných vlastnostech málo neprojevil v porovnání s pozvolným poklesem teploty příliš výrazně. Byly zaznamenány relativně vzájemně se kopírující trendy stanovených křivek. Pevnost v tlaku však jednoznačně nepoukazuje na souvislost chladicího režimu s touto materiálovou charakteristikou. Průběhy poklesů lze s ohledem na jejich vzájemné porovnání charakterizovat jako, více variabilnější, kdy za určitých teplotních podmínek dochází k patrnějším poklesům vlivem pozvolného chlazení a naopak za jiných teplot pak v případě rychlého chlazení vodou, resp. vzduchem, což dokládají stanovené hodnoty a jejich průběhy na příslušných grafech (viz *Obr. 39* a *Obr. 40*).

9 Závěr

Jedním ze závazných požadavků na stavby a výrobky je požární bezpečnost. Požární odolnost staveb je důležitá zejména z pohledu únosnosti konstrukce po určitou dobu potřebnou pro včasnou a bezpečnou evakuaci osob a zvířat. Požární odolnost staveb má zajistit a zvýšit bezpečnost stavby při požáru. Konstrukce může být rozdělena do několika požárních úseků.

Trh v ČR skýtá prostor pro vývoj a výzkum nových sanačních hmot s vyšší odolností vůči vysokým teplotám.

Možností i s ohledem na životní prostředí je využití alternativních surovin, které by jinak byly odpadem. Vývojem správkových malt ohleduplných k životnímu prostředí se zabývá celá řada vědeckých zahraničních týmů.

Z poznatků v oblasti vývoje správkových malt s odolností vůči vysokým teplotám a výsledků dosažených v této práci, lze upozorovat vhodnost použití umělého pórovitého kameniva, které již bylo teplotně zatíženo při vlastní výrobě. Další možností je kombinace těchto kameniv s dostupnými zdroji alternativních surovin, v tomto případě amfibolit.

Podstatný vliv má také cena, tudíž je důležité snížit náklady na výrobu správkových malt pro snazší umístění na trhu. Snížení nákladů do jisté míry ovlivníme optimalizací jednotlivých komponent. Dostupnost a doprava jednotlivých komponent je důležitým faktorem, ovlivňujícím cenu. Užitím alternativních surovin lze výrazně snížit výslednou cenu správkové hmoty. Z tohoto pohledu jsou vyvinuté malty šetrné k životnímu prostředí spotřebou vedlejších energetických produktů.

Kladný vliv je prokázán použitím celulózových vláken omezující smrštění v průběhu zrání malty. Teplotním zatěžováním vyhořívají, snižují tlak vodní páry v mikrostruktuře a zamezují explozivnímu odprýskávání při teplotním zatížení.

Ve většině publikací zabývajících se relevantní problematikou je uvedena jako vhodnější složka pro zlepšení tepelné odolnosti vysokopecní struska (v porovnání s vysokoteplotním popílkem). Provedeným výzkumem v této diplomové práci bylo ovšem zjištěno, že při výběru kvalitního popílku (v tomto případě z lokality Tušimice) lze dosáhnout i lepších parametrů, než v případě použití vysokopecní strusky (Kotouč Štramberk).

V rámci této práce byly vyvinuty dva typy správkových malt s kombinací kameniv popílkový agloporit a amfibolit. Tyto malty lze z dosažených výsledků zařadit dle požadovaných parametrů (viz *Tab. 1*) do kategorie třídy R3.

Na základě výsledků a zjištění lze hodnotit jako optimální pro navazující výzkum receptury CSG, CPG, CSM1/G2 a CPM1/G2. V případě receptur CSG1/M2 a CPG1/M2 by musela být provedena korekce složení pro zajištění dostatečné soudržnosti s podkladem. V případě CSM1/G2, tj. kombinace amfibolitu frakce 0-1 mm a popílkového agloporitu frakce 1-2 mm, byly vyrobeny malty, které odolaly teplotě 1200 °C bez výraznějších deformací. Receptury čistě na bázi amfibolitu jsou sice charakterizovány nejvyššími pevnostmi v tlaku a tahu za ohybu, ovšem jsou zcela nevyhovující s ohledem na odolnost vůči šokovému působení teplot a to konkrétně při hodnocení soudržnosti s podkladem. S přihlédnutím k ceně vstupních surovin, environmentálním aspektům a odolnosti vůči extrémním teplotám se jako výhodnější jeví varianta receptur se směsným pojivem obsahujícím vysokoteplotní popílek.

Využití alternativních surovin při výrobě správkových hmot s odolností vůči vysokým teplotám skýtá široký prostor pro navazující výzkum. Doporučit lze zejména objasnění některých souvislostí, tj. vývoje parametrů za daných podmínek (rozdílné typy chlazení, složení pojiva atd.) pomocí fyzikálně-chemických a mikrostrukturních metod. Rovněž by bylo vhodné posoudit s ohledem na teplotní odolnost další podstatné fyzikálně-mechanické parametry (např. modul pružnosti) a trvanlivost (odolnost vůči CHRL a mrazuvzdornost).

10 Seznam použitých zdrojů

- [1] BYDŽOVSKÝ, J., Technologie sanace, Modul M01. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební v Brně, 2007
- [2] POŽÁRNÍ ODOLNOST [online]. 2013 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://pozarniodolnost.cz/pred-projektovanim.html>
- [3] PYTLÍK, Petr. Vlastnosti a užití stavebních výrobků. Brno: VUTIUM, 1998, 399 s. ISBN 80-214-1123-6.
- [4] ČSN EN 13501-1+A1. Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. [s.l.] : [s.n.], Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010
- [5] ČSN EN 1363-1. Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky. [s.l.] : [s.n.], Český normalizační institut, 2000
- [6] 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. [s.l.] : [s.n.], Český normalizační institut, 2006
- [7] HERMES TECHNOLOGIE [online]. 2011 [cit. 2014-06-23]. Dostupné z: <http://www.hermes-technologie.com/en/mortar-products/ergelit-dry-mortar/repair-mortars.html>
- [8] Šottl, Jiří. Vývoj správkové malty s odolností proti vysokým teplotám. Brno, 2014. 106 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
- [9] DROCHYTKA, R., Lehké stavební látky, Modul M01. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební v Brně, 2006
- [10] KÁMEN ZBRASLAV [online]. 2014 [cit. 2014-07-12]. Dostupné z: <http://www.kamenzbraslav.cz/cs/tezba-kamene/kamenolom-zelesice/>

- [11] Olomoucky.denik.cz [online]. 2012 [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: <http://olomoucky.denik.cz/pozary/lavku-u-lodenice-zahalil-ohen-a-dym-cast-prerova-je-bez-proudu-20120504.html>
- [12] GEOOGICKÁ ENCYKLOPEDIE [online]. 2007 [cit. 2014-08-15]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?amfibolit>
- [13] Jiayuan Ye, Wensheng Zhang , Di Shi, Effect of elevated temperature on the properties of geopolymer synthesized from calcined ore-dressing tailing of bauxite and ground-granulated blast furnace slag[online], [Construction and Building Materials 69 (2014) 41–48]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [14] DROCHYTKA, Rostislav. Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TPSSBK III. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 265 s. ISBN 978-80-260-2210-7.
- [15] KOTOUČ ŠTRAMBERK [online]. 2014 [cit. 2014-10-06]. Dostupné z: http://www.kotouc.cz/produkt_struska.php
- [16] ČSN EN 1542. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou. [s.l.] : [s.n.], Český normalizační institut, 2000
- [17] HELA, R., Technologie betonu, Modul M01. Studijní opory pro studijní program s kombinovanou formou studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2005
- [18] Jong-Pil Won, Hee-Byoung Kang , Su-Jin Lee , Joo-Won Kang, Eco-friendly fire-proof high-strength polymer cementitious composites[online], [Construction and Building Materials 30 (2012) 406–412]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [19] M.M. Shoaib, S.A. Ahmedb,*, M.M. Balaha, Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars[online], [Cement and Concrete Research 31 (2001) 1533–1538]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [20] Jong-Pil Won, Hee-Byoung Kang, Su-Jin Lee, Sang-Woo Lee, Joo-Won Kang, Thermal characteristics of high-strength polymer–cement composites with lightweight aggregates and polypropylene fiber, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 10, October 2011, Pages 3810–3819. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>

- [21] Serdar Aydın, Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice, Fire Safety Journal, Volume 43, Issue 8, November 2008, Pages 610-617. Dostupné z:<http://www.sciencedirect.com>
- [22] KRAMPEHAREX [online]. 2014 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: http://www.krampeharex.com/cz/vlakna/p345ehled_produkt367/polypropylenova_sklen_283na_vlakna.htm
- [23] LAFARGE. JOURNAL LAFARGE CEMENT [online]. 04/ 2008 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z:<http://www.lafarge.cz>
- [24] SOLOMON COLORS [online]. 2014 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.solomoncolors.com/Products/UltraFiber-500/>
- [25] ČSN EN 12 190. Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt. [s.l.] : [s.n.], Český normalizační institut, 1999
- [26] Pan, Z.; Sanjayan, J., G.; Kong, D., L., Y. Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures, [online], [Construction and Building Materials 36, 2012, 365-372]. Concrete Society: Polymers in concrete, The Constructoin Press, 1975.
- [27] ČSN 73 0810. Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení. [s.l.] : [s.n.], Český normalizační institut, 2009
- [28] IZOLACE-INFO [online]. 2013 [cit. 2014-07-17]. Dostupné z: http://www.izolace-info.cz/aktuality/?nid=9505-pozarni-odolnost-stavebnich_konstrukci.html#.VLiFutKG_co

Seznam obrázků

Obr. 1 : Nanášení správkové hmoty stříkáním

Obr. 2 : Normová teplotní křivka

Obr. 3 : Požár mostu v Přerově

Obr. 4 : Požár elektroinstalace na mostě v Přerově

Obr. 5 : Pevnost v tlaku a chladicí metody s různým vodním součinitelem (zleva $w/c=0,4$; $w/c=0,5$; $w/c=0,6$)

Obr. 6 : Teplotní zatěžování dle křivky RABT ZTV

Obr. 7 : Mikrostruktura (vlevo bez přídavku porcelánu, vpravo s 15 % porcelánu)

Obr. 8 : Vliv průběhu zatěžování na pevnosti v tlaku

Obr. 9 : Vizuální porovnání malty po teplotním zatížení (a) 200°C, (b) 400°C, (c) 600°C, (d) 800°C, (e) 1000°C, (f) 1200°C

Obr. 10 : Sítový rozbor

Obr. 11 : Teplotní křivka pro tělesa zatížená teplotou 1000 °C

Obr. 12 : Optické zařízení snímající malty v průběhu zrání (na obrázku receptury CSM, CPM, CSG a CPG)

Obr. 13 : testované malty (A_{0-1} -CSM, B_{0-1} -CSG, C_{0-1} -CPG, D_{0-1} -CPM)

Obr. 14 : Optické zařízení pro snímání a záznam změn v průběhu zrání malt

Obr. 15 : Výstup z optického zařízení (červená-CPG, světle modrá-CSM, žlutá-CSG, zelenomodrá-CPM)

Obr. 16 : Teplotní zatěžování na 1000 °C

Obr. 17 : Vytažení těles z pece

Obr. 18 : Rozžhavený trámeček chlazený na vzduchu z teploty 1000 °C

Obr. 19 : Šokové chlazení vodou

Obr. 20 : Receptura CSM - porušení povrchových vrstev po chlazení vodou z 1000 °C

Obr. 21 : Receptura CSG - rychlé chlazení vodou z 1000 °C

Obr. 22 : Zatěžování teplotou 1200 °C a následná deformace trámečku CPG1/M2

- Obr. 23 : Trámeček CSG1/M2 neodolal expozici při teplotě 1200 °C, kdy došlo k výrazné deformaci
- Obr. 24 : Teplotní zatěžování malty na zkoušku soudržnosti
- Obr. 25 : Chlazení vodním proudem o teplotě vody cca 18 °C
- Obr. 26 : Změna rozměrů receptur CSM a CPM
- Obr. 27 : Změna rozměrů receptur CSG a CPG
- Obr. 28 : Vliv vodního chlazení na změny rozměrů u receptur CSG1/M2 a CPG1/M2
- Obr. 29 : Vliv vzduchového chlazení na změnu rozměrů receptur CSG1/M2 a CPG1/M2
- Obr. 30 : Vliv vodního chlazení na změnu rozměrů receptur CSM1/G2 a CPM1/G2
- Obr. 31 : Vliv vzduchového chlazení na změnu rozměrů receptur CSM1/G2 a CPM1/G2
- Obr. 32: Porovnání OH receptur CSM a CPM
- Obr. 33 : Porovnání OH receptur CSG a CPG
- Obr. 34 : OH receptur CSG1/M2 a CPG1/M2
- Obr. 35 : OH receptur CSM1/G2 a CPM1/G2
- Obr. 36 : OH porovnání všech receptur
- Obr. 37 : Pevnost v tlaku receptur CSM a CPM
- Obr. 38 : Pevnost v tlaku receptur CSG a CPG
- Obr. 39 : Pevnost v tlaku receptur CSG1/M2 a CPG1/M2
- Obr. 40 : Pevnost v tlaku receptur CSM1/G2 a CPM1/G2
- Obr. 41 : Souhrnné pevnosti v tlaku všech receptur při 22 °C
- Obr. 42 : Pevnost v tahu za ohybu receptur CSM a CPM
- Obr. 43 : Pevnost v tahu za ohybu receptur CSG a CPG
- Obr. 44 : Pevnost v tahu za ohybu receptur CSG1/M2 a CPG1/M2
- Obr. 45 : Pevnost v tahu za ohybu receptur CSM1/G2 a CPM1/G2
- Obr. 46 : Souhrnné vyhodnocení pevností v tahu za ohybu všech receptur při teplotě 22°C
- Obr. 47 : Grafické znázornění hodnot soudržností s podkladem před a po teplotním zatížení

Seznam tabulek

Tab. 1 : Požadované základní parametry správkových hmot dle ČSN EN 1504-3

Tab. 2 : Shrnutí vlastností nechráněných konstrukčních materiálů při požáru

Tab. 3 : Tři hlavní kritéria požární odolnosti

Tab. 4 : Složení jednotlivých frakcí písku, strusky ACS a strusky WQS

Tab. 5 : Složení malt

Tab. 6 : Pevnosti po 7, 14 a 28 dnech

Tab. 7 : Zbytkové pevnosti po teplotním zatížení na 1200 °C

Tab. 8 : Receptura CSM

Tab. 9 : Receptura CPM

Tab. 10 : Receptura CSG

Tab. 11 : Receptura CPG

Tab. 12 : Receptura CSG1/M1

Tab. 13 : Receptura CPG1/M2

Tab. 14 : Receptura CSM1/G2

Tab. 15 : Receptura CPM1/G2