



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

KOMPOZITNÍ MATERIÁLY SE SILIKÁTOVOU MATICÍ DO PROSTŘEDÍ VYSOKÝCH TEPLOT

COMPOSITE MATERIALS WITH SILICA MATRIX IN THE ENVIRONMENT OF HIGH
TEMPERATURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ewa Lisztwanová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2017



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

| | |
|-----------------|---|
| Student | Bc. Ewa Lisztwanová |
| Název | Kompozitní materiály se silikátovou maticí do prostředí vysokých teplot |
| Vedoucí práce | doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc. |
| Datum zadání | 31. 3. 2016 |
| Datum odevzdání | 13. 1. 2017 |

V Brně dne 31. 3. 2016

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Bodnárová, L. Kompozitní materiály ve stavebnictví. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 122 s. ISBN 80-214-2266-1.

Hai Yan Zhang, Venkatesh Kodur, Bo Wu, Liang Cao, Fan Wang, Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures, Construction and Building Materials, Volume 109, 15 April 2016, pp. 17-24.

Sutherland, S., Plucknett, K.P., Lewis, M.H. High temperature mechanical and thermal stability of silicate matrix composites. Composites Engineering, Vol. 5, 1995, p. 1367-1378.

Hakan Tacettin Türker, Müzeyyen Balçikanlı, İbrahim Halil Durmuş, Erdoğan Özbay, Mustafa Erdemir, Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level, Construction and Building Materials, Volume 104, 1 February 2016, Pages 169-180.

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

www.sciencedirect.com

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Kompozity do nepříznivých podmínek mohou představovat např. správkové hmoty pro opravu konstrukcí zasažených požárem. Nejběžněji jsou stále využívány materiály na bázi silikátové matrice a anorganického plniva. Záměrem práce je návrh a studium materiálů na bázi silikátové matrice modifikované alternativními surovinami, vč. případné náhrady plniva s předpokladem vystavení těchto hmot teplotě cca do 1200 °C.

V rámci vypracování diplomové práce je třeba nejprve provést průzkum z hlediska co nejvíce aktuálních poznatků o kompozitech rezistentních při vysokých teplotách a případně i agresivnímu prostředí. Podstatné bude využití zahraniční odborné literatury, příp. jiných dostupných informačních zdrojů.

Na základě vyhodnocení teoretických poznatků bude provedena selekce vhodných surovin z primárních i alternativních surovinových zdrojů a to jak pro matrici, tak plnivo a následně sestaveny receptury.

Navržené receptury budou laboratorně ověřeny (základní fyzikálně-mechanické, příp. pro doplnění fyzikálně-chemické a mikrostrukturní analýzy) a to jak po uložení v laboratorním prostředí, tak po teplotní expozici. Pro vybrané receptury bude také sledován vliv různých podmínek chlazení. Dále bude provedena případná korekce složení receptur a jejich opětovné ověření včetně formulace finální optimální receptury.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem a návrhem kompozitních materiálů na bázi silikátové matrice vhodných do nepříznivých podmínek, např. pro opravu betonových a železobetonových konstrukcí s předpokládaným zvýšeným rizikem vzniku požáru. V teoretické části jsou shrnuty základní poznatky týkající se požární odolnosti stavebních konstrukcí a chováním kompozitního systému v extrémních podmínkách. Teoreticky zaměřená část rovněž obsahuje poznatky o alkalicky aktivovaných materiálech a možnosti jejich použití do prostředí vysokých teplot. Na základě vyhodnocení teoretické části byly v části experimentální navrženy a ověřeny různé kompozitních materiálů se zvýšeným obsahem surovin pocházejících z alternativních zdrojů. Laboratorní výzkum byl založen na testování základních fyzikálně-mechanických parametrů včetně fázového složení a mikrostruktury navržených receptur před a po teplotní expozici 1200 °C. Posuzován byl také vliv různých podmínek chlazení.

KLÍČOVÁ SLOVA

kompozit, silikát, vysokopecní struska, teplárenská škvára, vysokoteplotní popílek, alkalická aktivace, extrémní teploty, šokové chlazení

ABSTRACT

This thesis deals with the study and design of composite materials based on silica matrix suitable for extreme conditions, eg. for the repair of concrete structures with anticipated increased risk of fire. The theoretical part summarizes basic knowledge concerning the fire resistance of structures and the behavior of the composite system during extreme conditions. Theoretically oriented section also contains information on alkali-activated materials and their use in high temperature environments. Based on the evaluation of the theoretical part of the experiment were designed and tested different types of composite materials with increased content of raw materials from alternative sources. Laboratory research has been based on testing of basic physico-mechanical parameters including phase composition and microstructure of the proposed formulations before and after thermal exposure of 1200 °C. Also considered was the effect of different cooling conditions.

KEYWORDS

composite, silicate, blast furnace slag, slag, fly ash, alkali activation, extreme temperatures, shock cooling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Ewa Lisztwanová *Kompozitní materiály se silikátovou maticí do prostředí vysokých teplot*. Brno, 2017. 106 s., 4 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Ewa Lisztwanová

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěla poděkovat doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc. za vedení této diplomové práce, Ing. Tomáši Melicharovi, Ph.D. za obrovskou dávku trpělivosti, cenné rady a pomoc při zpracování práce. Děkuji také všem zaměstnancům zkušebních laboratoří ÚTHD FAST VUT v Brně za pomoc při zpracování experimentální části. Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS. Poděkování patří také pracovníkům Centra AdMaS a zejména panu Jiřímu Klímovi za pomoc při zpracování elektronové mikroskopie a XRD.

Obsah

| | |
|--|----|
| ÚVOD..... | 11 |
| CÍL PRÁCE..... | 12 |
| I. TEORETICKÁ ČÁST..... | 13 |
| 1. Chování kompozitního systému při extrémních podmínkách..... | 13 |
| 1.1. Požární odolnost stavebních konstrukcí..... | 13 |
| 1.2. Expozice vysokými teplotami..... | 15 |
| 1.3. Explozivní odprýskávání..... | 18 |
| 1.4. Správkové malty odolné extrémním podmínkám..... | 19 |
| 2. Alkalicky aktivované materiály..... | 22 |
| 2.1. Mechanismus alkalické aktivace..... | 23 |
| 2.2. Materiály pro alkalickou aktivaci..... | 26 |
| 2.2.1. Vysokopeční struska..... | 27 |
| 2.2.2. Elektrárenský popílek..... | 30 |
| 2.2.3. Metakaolin..... | 32 |
| 2.3. Alkalické aktivátory..... | 34 |
| 2.3.1. Vodní sklo..... | 35 |
| 2.3.2. Hydroxidy..... | 36 |
| 2.3.3. Soli slabých kyselin..... | 36 |
| 2.4. Alkalicky aktivovaná struska..... | 37 |
| 2.5. Alkalicky aktivovaný popílek..... | 38 |
| 2.6. Alkalická aktivace strusky s přídavkem popílku..... | 39 |
| 2.7. Chování AAM za vysokých teplot..... | 40 |
| II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST..... | 43 |
| 3. Metodika práce..... | 43 |
| 4. Zkušební metody a postupy..... | 45 |
| 4.1. Testování v pozorovací peci..... | 45 |
| 4.2. Stanovení zrnitosti kameniva..... | 45 |
| 4.3. Teplotní expozice v muflové peci..... | 46 |
| 4.4. Šokové chlazení..... | 47 |
| 4.5. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty..... | 48 |
| 4.6. Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku..... | 48 |
| 4.7. Rastrovací elektronová mikroskopie..... | 49 |

| | |
|---|-----|
| 4.8. Rentgenová difrakční analýza | 50 |
| 5. Vstupní suroviny | 51 |
| 5.1. Pojivová složka..... | 51 |
| 5.1.1. Cement..... | 51 |
| 5.1.2. Vysokopeční struska..... | 51 |
| 5.1.3. Struska Oslavany | 52 |
| 5.1.4. Popílek..... | 53 |
| 5.2. Plnivo..... | 53 |
| 5.3. Polymerní přísada | 55 |
| 5.4. Rozptýlená výztuž | 55 |
| 5.5. Vodní sklo a NaOH | 56 |
| 5.6. Voda | 57 |
| 6. Postup přípravy zkušebních těles | 58 |
| 6.1. Výroba zkušebních těles..... | 58 |
| 6.2. Návrh teplotních expozičních podmínek..... | 59 |
| 7. Vyhodnocení experimentů..... | 61 |
| 7.1. Etapa vývoje matrice I..... | 61 |
| 7.2. Etapa vývoje matrice II..... | 70 |
| 7.3. Etapa vývoje kompozitního materiálu..... | 77 |
| 8. Diskuze výsledků..... | 93 |
| 9. Závěr..... | 96 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 98 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 103 |
| SEZNAM TABULEK | 104 |
| SEZNAM GRAFŮ | 105 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ..... | 106 |
| PŘÍLOHY | 107 |

ÚVOD

V dnešní době je velký důraz kladen jak na bezpečnost práce, tak na bezpečnosti při užívání různých druhů materiálů v konstrukcích. Současný zvýšený zájem o pochopení chování stavebních konstrukcí, a zejména pak materiálů z nich vytvořených, zasažených požárem je spjat se snahou redukovat jak rozsáhlé ztráty na majetku, tak se zvyšováním bezpečnosti osob a ochranou jejich zdraví a životů. Tato problematika však není jen záležitostí současnosti, prolíná se stavebnictvím již dlouhá desetiletí. Důležitým ukazatelem je požární odolnost konstrukcí, proto tato práce navazuje na dlouhodobý a velmi důležitý trend zvyšování požární bezpečnosti staveb, který je v souladu s přílohou č. 1 o základních požadavcích na stavby v Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 305/2011. [48]

Kromě důrazu na požární odolnost konstrukcí je dnes také cílem snížení celkových emisí unikajících do ovzduší. Ve stavebnictví se nejvíce emisí vyprodukuje při výrobě stavebních materiálů. Jeden z největších podílů na vyprodukovaných emisích ve stavebním průmyslu má proces výroby portlandského slínku, při jehož výrobě dochází k uvolňování velkého množství CO_2 . Ten vzniká mimo jiné i při spalování fosilních paliv a při rozkladu vápence v rotačních pecích. Redukce těchto emisí je možná několika způsoby, od snížení množství spalovaných paliv, přes snížení množství základní suroviny pro výrobu slínku. Další z možností, jak snížit produkované emise a při tom zohlednit ekologická kritéria, je náhrada cementu alternativními surovinami, jakými jsou struska, škvára a popílký aj. Navíc mnoho vedlejších produktů a druhotných surovin stále nenalézá uplatnění v plné míře. Při jejich zužitkování ve stavebních materiálech bude tedy rovněž patrný pozitivní vliv na životní prostředí. Možností, jak zakomponovat zmíněné suroviny ve stavebních materiálech je hned několik. Kromě náhrady cementu může být také nahrazována plnivová složka, tj. kamenivo. Alternativní suroviny ovšem nemusí být využívány jen jako substituční složka cementu. V případě jejich alkalické aktivace by bylo možné v matricích, např. teplotně odolných kompozitů využít mnohem větší množství než při parciální náhradě cementu v polymer-cementových hmotách.

CÍL PRÁCE

Záměrem diplomové práce je zkoumání kompozitních materiálůvých systémů na bázi silikátové matrice, které jsou vhodné k aplikaci do nepříznivých prostředí, zejména do prostředí vysokých teplot. Z hlediska řešení bylo potřeba cíle práce koncipovat do několika dílčích úseků.

V rámci cíle studia a hodnocení teoretických poznatků bude potřeba v teoretické části shrnout zjištěné informace o chování zmíněných kompozitních systému při extrémních podmínkách. Pro zajištění co největšího rozsahu postižení dané problematiky a objektivnosti bude nutné čerpat zejména ze zahraničních zdrojů (odborných článků konferencí, vědeckých periodik atd.), ale i z dostupné tuzemské literatury. Vyhodnocení takto získaných informací bude velmi podstatným zdrojem pro navazující experimentální část.

Dílčím cílem práce bude dále laboratorní ověření vybraných důležitých vlivů a jevů, jež mohou nastat v nově navržených kompozitních systémech při jejich expozici extrémním teplotním podmínkám. Pro tento účel bude nejprve potřeba na základě vyhodnocených poznatků z teoretické části provést selekci vhodných surovin z primárních i alternativních zdrojů, a to jak pro matrici, tak pro plnivo. Volba vhodných složek kompozitního materiálů je jedním z klíčových aspektů pro dosažení požadovaných vlastností. Pozornost bude zaměřena na dva způsoby zpevnění matrice – použití cementu a dále alkalické aktivace. Důraz bude nutné klást dále na vývoj samotné matrice, kde bude v první fázi potřeba sledovat základní parametry a chování při termickém namáhání s určením maximální teplotní odolnosti a popis dějů odehrávajících se při zvyšující se teplotě. Vhodné matrice, příp. ještě optimalizované, budou v dalším kroku zkombinovány s plnivem do kompozitního materiálu. U těchto kompozitů bude pak podstatné využití komplexu analytických a zkušebních metodik pro objektivní zhodnocení chování nově navržených materiálů při náhlých teplotních změnách. Proto bude potřeba přistoupit k provedení jak fyzikálně-mechanických, tak fyzikálně-chemických metod s doplněním technik pro posouzení struktury, příp. mikrostruktury.

V neposlední řadě si práce klade za cíl vyhodnocení všech získaných poznatků v souvislosti s dosaženými výsledky pro výběr optimálního složení teplotně odolného kompozitu, příp. doporučení pro navazující výzkum.

I. TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části jsou shrnuty dosavadní poznatky o kompozitech se silikátovou maticí, jejich vlastnostech a chování při extrémních podmínkách. Pozornost je zaměřena zejména na správkové malty. V další části jsou rozebrány alkalicky aktivované materiály (AAM), jejich mechanismus aktivace, struktura, příprava a základní fyzikálně-mechanické vlastnosti, včetně popisu jejich chování při extrémních podmínkách. Závěr teoretické části shrnuje získané poznatky s vyvození pro navazující experimentální část.

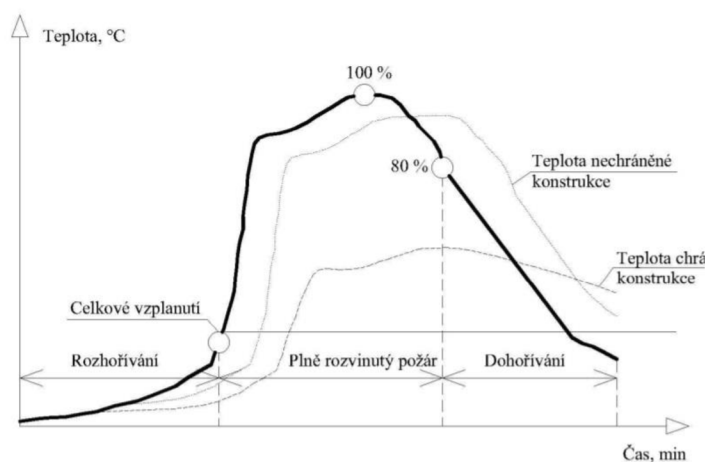
1. Chování kompozitního systému při extrémních podmínkách

1.1. Požární odolnost stavebních konstrukcí

Požár je živel, který lze charakterizovat časovým průběhem teplot, tlaku a složením hořících produktů v prostoru. Jako prostor se obvykle uvažuje požární úsek stavebního objektu, který je ohraničen požárně odolnými konstrukcemi, či konstrukcemi z části bez odolnosti. Požár lze rozdělit na tři časová stádia:

- rozhořívání,
- plně rozvinutí požáru,
- dohořívání.

Při rozhořívání požár roste a šíří se z místa jeho vzniku. Plně rozvinutý požár je charakterizován intenzivním hořením v prostoru celého požárního úseku. V posledním stádiu dochází k dohořívání a chladnutí. Fáze požáru jsou zobrazeny na obrázku 1.



Obrázek 1: Fáze požáru [42]

Obecně lze požární odolnost stavební konstrukce definovat jako schopnost konstrukce odolávat účinku plně rozvinutého požáru, aniž by došlo k narušení zejména její únosnosti a stability, celistvosti a izolační schopnosti. Narušením je myšlena ztráta stability, vznik trhlin v konstrukci nebo vznícení hořlavých látek prostupem tepla. Požární odolnost musí být zachována po celou dobu životnosti konstrukce, určuje ji stupeň požární bezpečnosti požárního úseku, udává se v minutách, zároveň se určuje také druh konstrukce podle použitých hmot. Stavební konstrukce se pak podle požární odolnosti zařazují do stupnice požární odolnosti: 15, 30, 45, 60, 90, 120 a 180 minut. [3]

Pro klasifikaci konstrukcí do této stupnice se používají písemné značky, které charakterizují dosažené mezní stavy požární odolnosti. Mezi mezní stavy požární odolnosti patří mezní stav únosnosti, který se označuje $R(t)$, kde t je doba v minutách, např. $R30$ značí, že mezní stav únosnosti nenastane dříve než za 30 minut. Dále mezní stav celistvosti E , mezní stav limitních teplot I , mezní stav limitní hustoty tepelného toku ve stanoveném místě W a mezní stav kouřotěsnosti S , kdy se prokazuje, že intenzita pronikání studeného kouře v $m^3 \cdot hod^{-1}$ nepřekročí mezní hodnotu. Mezní stav limitních teplot se dá prokázat výpočtem přestupu a vedení tepla v konstrukci, přičemž se hodnotí teplota na neohřívané straně konstrukce. [42]

Poškození silikátového kompozitu v důsledku požáru není považováno za degrační mechanismus, ale spíše za nehodu. Nejčastěji k takovým nehodám dochází v silničních tunelech. Materiály použité při výstavbě tunelů musí vykazovat odpovídající odolnost vůči ohni, a to takovým způsobem, aby byla zajištěna jejich soudržnost během evakuace osob a hašení požáru. Tyto materiály musí vykazovat zejména nízkou hořlavost, která snižuje rychlost a rozsah šíření ohně, nízkou výhřevnost, která snižuje rozsah požáru a tím pádem i dopad na konstrukci i prvky pro ochranu osob. Další žádanou vlastností je minimální a v idealizovaném případě nulová produkce toxinů v ohni. Avšak uvolňování plynů při požáru nelze předejít, ale rizika jejich vzniku a šíření lze snižovat, například vhodnou volbou materiálů a návrhem bezpečnostních opatření, jakými jsou např. únikové cesty. Pozornost by měla být také věnována vlastnostem povrchů stěn, včetně dlaždic a nátěrů, odvodnění či osvětlovacích prvků. Nároky na ně kladené by měly zahrnovat i požadavky na jejich chování v ohni. [43]

Pro sanaci konstrukcí zasažených požárem mohou sloužit cementové malty modifikované polymery (PCC), u kterých byla již v minulosti prokázána odolnost proti požáru. Stavební výrobky, v tomto případě 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. Výrobky třídy A1 nebudou přispívat k požáru v žádném jeho stádiu. Základní třídy hořlavosti jsou zatříděny do pěti stupňů:

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

Zkoušky požární odolnosti jsou specifikovány v normě ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky. [44]

1.2.Expozice vysokými teplotami

V kompozitním systému dochází vlivem vysokých teplot k mnoha fyzikálním i chemickým reakcím. Vysoká teplota vážně poškozuje mikro a meso strukturu kompozitu a v obecném měřítku dochází k její degradaci. V důsledku vzniku tlaku ve struktuře dochází nejdříve k explozivnímu odprýskávání povrchových vrstev kompozitního materiálu a následné degradaci celého systému. Trvanlivost kompozitu za nepříznivých podmínek úzce souvisí s jeho složením. Důležitým aspektem při sestavování receptury je vodní součinitel, tedy poměr záměsové vody a pojiva, složení matrice, dále typ plniva, poměr příměsí a použití různých druhů vláken. [1]

Při vystavení kompozitního systému vysokým teplotám dochází v první řadě k uvolňování fyzikálně vázané vody a vlhkosti při 100 °C, které se nacházejí v pórech materiálu. Rychlost odpařování fyzikálně vázané vody závisí jak na druhu matrice, tak na jejím provedení. Dosažením teplot od 150–170 °C dochází k rozkladu sádrovce

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, který je obsažený ve slínku. Při teplotách do 200 °C je zaznamenán počátek dehydratace C-S-H gelu. Při teplotě do 300 °C dochází ve struktuře k odpaření chemicky vázané vody, dochází také k povrchovému poškození materiálu v podobě mikrotrhlin. Mírně se může zvyšovat pevnost v tlaku, ale podle studií dochází také k poklesu hodnot pevnosti v tahu a modulu pružnosti. Při teplotách 400–600 °C se z matrice začíná odpařovat chemicky vázaná voda a začíná se rozkládat portlandit, který přechází na volné CaO. Pokud je konstrukce zasažená požárem okamžitě hašena, nastává problém právě s volným CaO, který ve styku s vodou začíná opět hydratovat. Vytváří se $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který zvětšuje svůj objem až o 15 %. Vlivem krystalizačního tlaku při této přeměně dochází k trhlinám v matrici a v nejhorším případě může dojít i k celkové destrukci materiálu. K rozkladu vápence dochází při dosažení teploty asi 700 °C, kdy kompozit se silikátovou matricí značně degraduje. V rozmezích teplot 600–800 °C se začíná tvořit $\beta - \text{C}_2\text{S}$, doprovázený druhou fází rozkladů C-S-H gelů. Ve struktuře kompozitu se začínají objevovat mikrotrhliny, materiál se drolí. Při překročení teploty nad 800 °C se v kompozitu již nenachází žádná chemicky vázaná voda, hydraulické vazby přecházejí ve vazby keramické, které jsou stabilní do cca 900 °C. Zmíněné keramické vazby obecně mohou zlepšit mechanické vlastnosti materiálu – zvyšuje se pevnost v tlaku, pevnost v ohybu i modul pružnosti. Tento efekt lze nazvat také slinutím matrice. Je doprovázen uvolňováním oxidu uhličitého. Při překročení teploty kolem 1200 °C dochází k tavení některých složek matrice, nastává také totální destrukce a v některých případech také rozpad kompozitu. Žárovzdorné materiály mají teplotu tavení vyšší, pochybuje se okolo 1550 °C. [1,2]

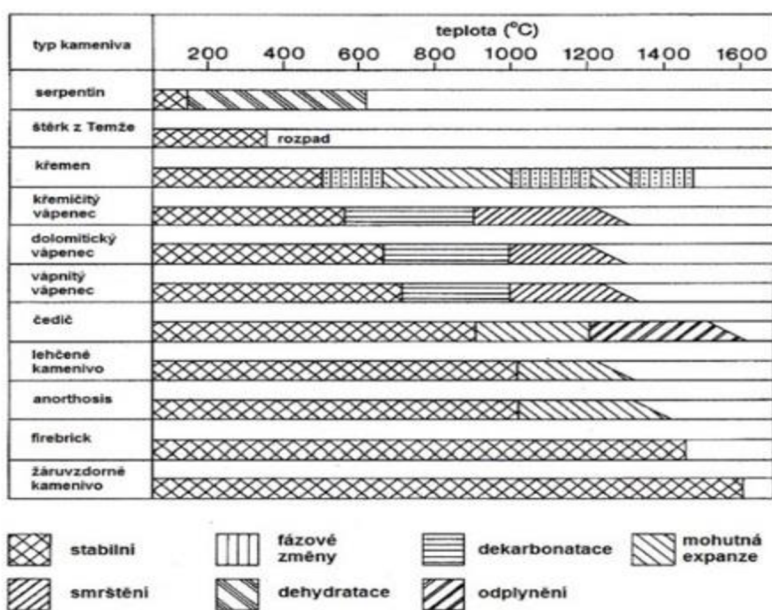
Kamenivo zaujímá asi 60-80 % objemu v kompozitních materiálech, proto je důležité věnovat mu stejnou pozornost jako samotné matrici. Vlastnosti kompozitu ovlivňuje zejména tepelná roztažnost kameniva, se kterou úzce souvisí objemové změny. Tepelná roztažnost je dána chemickým a mineralogickým složením daného typu kameniva. V tabulce č. 1 níže jsou uvedeny koeficienty lineární tepelné roztažnosti pro různé typy hornin. Malé objemové změny jsou zaznamenávány u čediče, pemzy, vápencových kameniv nebo škváry. K největším objemovým a tvarovým změnám dochází u kameniva, které se z majoritní části skládá z křemene. Křemence za působení vysoké teploty pukají, což vede k tvorbě mikrotrhlin v kompozitním systému. Kritickou teplotou je 573 °C, kdy v kamenivu obsahujícím hlavně křemen dochází k rychlé modifikační přeměně právě zmíněného křemene. Triklinická soustava přechází na soustavu hexagonální. Tato přeměna je spojena zejména s nárůstem objemu o zhruba 0,84 %. Pevnost při nižší teplotě, než je zmiňovaných

573 °C výrazně klesá. Tento proces je reversibilní, to znamená, že se křemen po ochlazení vrací do původního stavu. [2]

Tabulka 1: Koeficienty lineární tepelné roztažnosti [2]

| Druh horniny | Koeficient lineární tepelné roztažnosti [$10^{-6} \cdot \text{C}^{-1}$] |
|--------------|---|
| Čedič | 3,9 - 9,7 |
| Dolomit | 6,7 - 8,6 |
| Pískovec | 4,3 - 13,9 |
| Vápenec | 0,9 - 12,2 |
| Žula | 1,8 - 11,9 |

Teplota tání kameniva je závislá na jeho mineralogickém složení. Kamenivo obsahující uhličitany, jako je například vápenec či dolomit, degraduje při cca 700 °C, kdy dochází k rozpadu CaCO_3 na CaO , za uvolňování CO_2 . Tato kameniva se vlivem zvýšené teploty vypalují. Při teplotě okolo 800 °C mohou CaO hydráty expandovat až o 40 %. U strusky dochází k tavení. Pórovitá pemza odolává teplotám až 1000 °C. Metamorfované horniny jsou rovněž schopny odolat teplotám do 1000 °C, granit se začíná tavit při teplotě 1210–1250 °C, čediče se taví při teplotě cca 1050 °C, tavení je doprovázeno uvolňováním plynu a expanzí. Obrázek č. 2 znázorňuje děje probíhající u různých typů kameniva za působení zvýšené teploty. [2]



Obrázek 2: Děje probíhající u různých typů kameniva za působení zvýšené teploty [4]

1.3. Explosivní odprýskávání

Odprýskávání (spalling) povrchových vrstev kompozitních materiálů zejména na silikátové bázi, jakým je například beton, je způsobeno jeho vystavením zvýšeným teplotám. Přestože se beton v extrémních podmínkách, jakými jsou například vysoké teploty během požáru, vyznačuje vlastnostmi, které jsou považovány za výhodu, např. nízká tepelná difuzivita nebo nehořlavost, je jev odprýskávání velmi závažnou poruchou, ke které velmi často dochází. Příklady lze nalézt v minulosti, kdy ke značnému odprýskávání došlo při požáru v Eurotunelu pod Lamanšským průlivem v roce 1996, Mont Blanc tunelu v roce 1999 nebo v Gotthardském tunelu v roce 2001. Teplota požáru způsobila kolaps, kdy došlo k destrukci struktury vrstvy po vrstvě, ale zapříčinila také významné finanční ztráty.

Explosivní odprýskávání je ovlivněno několika základními činiteli, jakými jsou druh použitého kameniva, rychlost tepelného zatížení, chemické složení matrice, profil teplotní křivky, povrchové silové zatížení, rozsah tlakových napětí, vlhkost kompozitního systému či pórový tlak. V případě jeho výskytu může dojít k rozsáhlé poruše celého kompozitního systému.

K odprýskávání dochází v průběhu prvních 15–30 minut od propuknutí požáru. Během zahřívání konstrukce dochází k transportu vlhkosti do chladnějších zón, kde se vytváří vrstva plně nasycená vodou. Jde o jakousi vlhkostní clonu, která je charakterizována nízkou propustností a působí jako nepropustná bariéra pro plyny. Souběžně se zvyšováním teploty během požáru voda obsažená v pórové struktuře hmoty mění své skupenství na plyn, který nemůže proniknout nepropustnou bariérou, což má za následek nárůst vnitřního tlaku ve struktuře. Důsledkem vzniku tlaku je právě odprýskávání.

Jelikož je explosivní odprýskávání negativním jevem, došlo k vyvinutí celé řady opatření k jeho snížení nebo prevenci. Jednou z možností je aplikace izolačních desek, obkladových panelů nebo stříkaných materiálů, které omezují šíření teplot na povrchu konstrukce. Nejúčinnější a nejjednodušší možností, jak odprýskávání redukovat, je vytvoření sítě pórů v materiálu, kterými může vodní pára unikat a fungují tedy jako úniková cesta. Vhodným materiálem se ukázaly být například polypropylenová vlákna, jejichž teplota tání je 170 °C. Táním PP dochází k vytvoření sítě mikropórů a kanálků, které dovolují vodním parám odchod ze struktury, zmenšují tak pórový tlak, a tak i riziko výskytu odprýskávání. Použití PP vláken prokazatelně redukuje výskyt trhlin na povrchu konstrukce. Skýtá se ale také množnost použití jiných vláken na makromolekulární bázi. [42]

1.4. Správkové malty odolné extrémním podmínkám

Na správkové malty jako takové jsou kladeny specifické požadavky, jakými jsou například minimální objemové změny, a to zejména v důsledku změn teplot či vlhkosti. Požadován je také omezený vznik smršťovacích trhlin, pevnost v tlaku, vysoká soudržnost s podkladem aj. Správkové hmoty nacházejí své použití při speciálních aplikacích pro obnovení degradovaných prvků konstrukcí, zlepšení statických vlastností prvků nebo ke zvětšení krycí vrstvy nad výztuží. [49]

Podle druhu pojiva jsou obvykle správkové malty děleny na:

- Cementové malty a betony – CC (Cement Concrete) – malty a betony, jejichž pojivem je především cement,
- Polymer-cementové malty a betony – PCC (Polymer Cement Concrete) – malty a betony s cementovým pojivem modifikované polymerními přísadami, nebo cementové betony impregnované polymerem – PIC (Polymer Impregnated Concrete),
- Polymerbetony a polymermalty – PC (Polymer Concrete) – malty a betony, jejichž pojivem jsou polymerní pryskyřice,
- Injektážní hmoty a zálivky – nejčastěji malty na bázi portlandského cementu pro speciální aplikace nebo epoxidové pryskyřice. [45]

Specifikace jednotlivých parametrů pro správkové malty jsou uvedeny v normě ČSN EN 1054-3. Kvalitativní požadavky vyňaté z normy jsou tyto:

- Vysoká soudržnost s podkladem,
- Malá nasákavost a dobrá vodotěsnost,
- Mrazuvzdornost minimálně na úrovni T100, v závislosti na konkrétních podmínkách prostředí,
- Minimální objemové změny v důsledku změny vlhkosti a teploty,
- Omezený vznik trhlin způsobených smršťováním,
- Pevnost v tlaku, resp. pevnost v tahu za ohybu by měly být na stejné, případně na vyšší úrovni než podkladní beton, má-li správková hmota statickou funkci,

- Odolnost vůči agresivním médiím musí odpovídat podmínkám dle konkrétního prostředí.

Konkrétní požadavky na jednotlivé parametry správkových malt podle ČSN EN 1504-3 jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 2: Požadované základní parametry správkových malt [45]

| Parametr | Správkové hmoty bez statické funkce | | Správkové hmoty se statickou funkcí | |
|---|-------------------------------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Třída R1 | Třída R2 | Třída R3 | Třída R4 |
| Pevnost v tlaku (ČSN EN 12109) | ≥ 10 MPa | ≥ 15 MPa | ≥ 25 MPa | ≥ 45 MPa |
| Obsah chloridových iontů (ČSN EN 1015-17 nebo ČSN EN 14629) | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % |
| Soudržnost¹ (ČSN EN 1542) | ≥ 0,8 MPa | ≥ 0,8 MPa | ≥ 1,5 MPa | ≥ 2 MPa |
| Vázané smršťování a rozpínání^{1,2} - soudržnost po zkoušce (ČSN EN 12617-4) | Bez požadavků | ≥ 0,8 MPa | ≥ 1,5 MPa | ≥ 2 MPa |
| Modul pružnosti (ČSN EN 13412 nebo ČSN EN ISO 6784) | Bez požadavků | Bez požadavků | ≥ 15 GPa | ≥ 20 GPa |
| Odolnost proti karbonataci (ČSN EN 13295) | Bez požadavků | Bez požadavků | $d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45)) | $d_k \leq$ kontrolní beton (MC(0,45)) |
| Tepelná slučitelnost | | | | |
| Zmrazování a tání - soudržnost po 50 cyklech | Vizuální prohlídka | ≥ 0,8 MPa | ≥ 1,5 MPa | ≥ 2 MPa |
| Náporové skrápění - soudržnost po 30 cyklech | Vizuální prohlídka | ≥ 0,8 MPa | ≥ 1,5 MPa | ≥ 2 MPa |
| Cyklování za sucha - soudržnost po 30 cyklech (ČSN 13687-1 až 5) | Vizuální prohlídka | ≥ 0,8 MPa | ≥ 1,5 MPa | ≥ 2 MPa |

¹ Uvedená hodnota je hodnotou průměrnou a jednotlivé hodnoty nesmí být menší než 75 % uvedeného požadavku

² Maximální přípustná šířka trhliny je ≤ 0,05 mm, bez delaminace

Samotná cementová matrice jako taková není příliš odolná vůči působení extrémních teplot, proto bylo provedeno velké množství výzkumu založených na modifikaci pojivové složky. Nejčastěji se jako modifikátor využívá snadno dostupná vysokopecní struska, která může sloužit jako částečná, ale i úplná náhrada cementu v polymer-cementových správkových hmotách, odolných extrémním podmínkám.

Aydin [46] se ve svém výzkumu věnoval vývoji malty obsahující různé množství vysokopecní strusky s přidavkem pemzy. Zhotovené malty měly vynikat vysokou odolností požáru. Účinnost malt byla testována do teploty 900 °C, kdy byl zkoumán také vliv různého chlazení. Chlazení bylo zvoleno pomalé na vzduchu a šokové, prostřednictvím vody. Obsah strusky v této studii byl zvolen v poměrech 0, 20, 40, 60 a 80 %. Výsledky ukázaly, že malty nevykazovaly žádné ztráty pevnosti až do teploty 600 °C. Vyšší pevnosti ztráty byly zaznamenány v případě vzorků chlazených vodou. Zhotovené cementové malty s využitím vysokopecní strusky prokázaly svou vhodnost jako víceúčelový materiál, zejména pro konstrukce vystavené zvýšenému teplotnímu namáhání.

Vývoj vhodné správkové malty nebývá zaměřený pouze na složení matrice, ale také na druhu použitého kameniva, které ve správkové maltě zaujímá obvykle 60-80 % objemu. Vysokopevnostní polymer-cementovou maltu navrhl kolektiv autorů ve studii [47]. Malta kombinovala různé druhy lehkého kameniva, které vykazovaly dobrou teplotní odolnost (až do teplot 1000 °C), použita byla také polymerní vlákna, v tomto případě polypropylenová. Výzkum byl zaměřen zejména na vliv množství polymerních vláken na případný vznik explozivního odprýskávání. Cílem bylo prokázání optimální dávky těchto vláken a zvolení nejvhodnějšího lehkého kameniva. Testován byl perlit, vermikulit a pyrofylit. Z výsledků vyšlo najevo, že vyšší obsah PP vláken má příznivý vliv na omezení vzniku trhlin na povrchu malty. Nejvyšší tepelné stability bylo dosaženo u směsi s expandovaným perlitem, která se vyznačovala nejnižším hmotnostním úbytkem. Naopak k největšími hmotnostnímu úbytku a zároveň ztrátě soudržnosti došlo v případě vzorků s pyrofylitem. Zkoumány byly také základní fyzikálně-mechanické parametry, jakými jsou pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, tepelná vodivost, provedeny byly také DTA analýzy. Tyto zkoušky a analýzy ukázaly, že malta vyrobená s expandovaným perlitem a obsahem PP vláken v množství 0,2 % vykazovala nejlepší fyzikální, mechanické i tepelné vlastnosti.

2. Alkalicky aktivované materiály

Přetrvávající dlouhodobá snaha vytvářet nové materiály otevírá cestu novým postupům a jejich aplikacím ve stavebnictví. V případě alkalicky aktivovaných materiálů (AAM) se ale nedá hovořit jako o „nových“ materiálech, neboť první pokusy o alkalickou aktivaci se datují k roku 1930, kdy Kühn zkoumal proces tuhnutí mleté granulované vysokopeční strusky. Tuto strusku aktivoval pomocí síranu sodného a uhličitanu draselného. Další pokusy provedli Chassevent a Prudon ve 30. letech, kdy ověřovali možnost alkalické aktivace strusky pomocí roztoku uhličitanu sodného. Vytvořili také alkalický roztok reakcí alkalické soli se silnou zásadou. V 50. letech 20. století se prof. Glukhovskij věnoval aluminosilikátovým pojivům s nízkým obsahem vápníku, případně i bez vápníku (jíly). Tato pojiva byla aktivována alkalickými roztoky. Tyto materiály Glukhovskij nazval jako gruncementy, které našly praktické uplatnění hlavně na území bývalého SSSR ve formě bloků pro konstrukční účely, viz obrázek níže. [6]



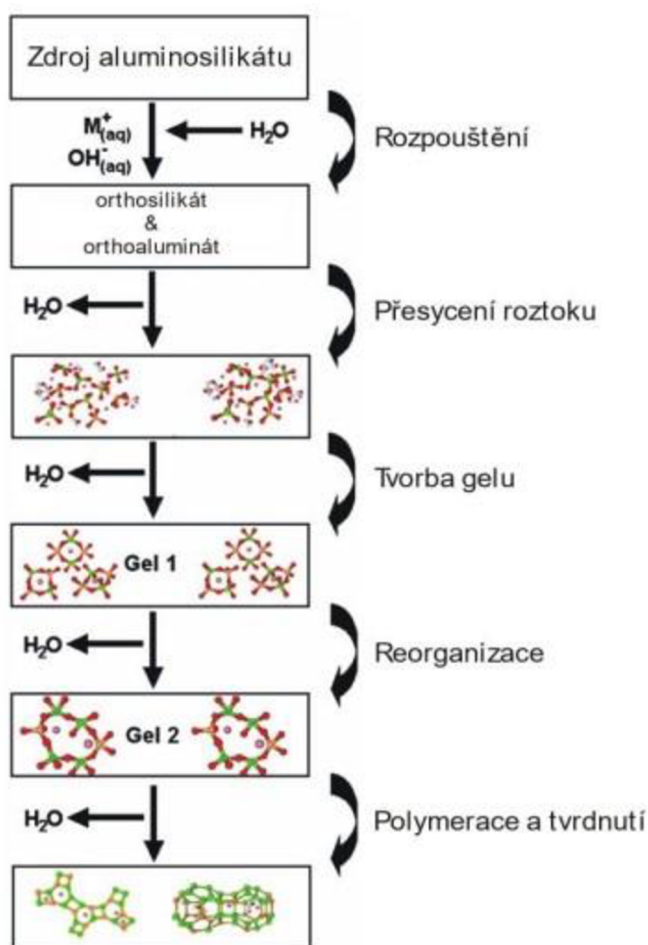
Obrázek 3: Část stavby z gruntosilikátových bloků [5]

Od 70. let 20. století do dnešních dnů se o alkalickou aktivaci zajímá francouzský vědec, prof. Joseph Davidovitz. Pozornost zaměřil na materiály připravované alkalickou aktivací kalcinovaných jílových minerálů, především tedy metakaolinu. Vzhledem ke struktuře alkalicky aktivovaného metakaolinu, která se podobá přírodním zeolitům, nazval Davidovitz tyto materiály jako „geopolymery“. Podle Davidovitzovy teorie mají geopolymery amorfni až semikrystalickou strukturu tvořenou trojrozměrnou sítí SiO_4 a AlO_4 . Na výzkum Davidovitze navázal prof. Krivenko, který se zajímal o tvorbu struktury v alkalických cementech. [6,7]

2.1. Mechanismus alkalické aktivace

Základním principem alkalické aktivace je reakce vhodného aluminosilikátového prekurzoru (metakaolin, popílek, struska, cihelný prach, aj.) s alkalickým aktivátorem (roztok alkalického hydroxidu, křemičitanu, uhličitanu, aj.). V silně zásaditém prostředí (hodnota pH překračuje 12) se nejdříve rozpouští aluminosilikáty. Zjednodušeně se jedná o hydrolyzu sloučenin s kyslíkovými můstky mezi jednotlivými polyedry SiO_4^{4-} a AlO_4^{5-} . Rozpouštěním aluminosilikátů dojde ke vzniku přesyceného roztoku, který obsahuje hlavně monomerní složky $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$, $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^-$ a $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$. Monomerní složky dále kondenzují za vzniku aluminosilikátového gelu. Tento gel po určitém časovém úseku, kdy se začínají vytvářet nové sloučeniny, tuhne na výsledný produkt. Důležitým faktorem při tvorbě geopolymerní struktury je přítomnost iontu alkalického kovu, který vyrovnává záporný náboj, jenž vzniká na atomu hliníku ve IV-násobné koordinaci. Vlastnosti a struktura výsledného produktu jsou pak závislé na vstupních surovinách a na podmínkách, za kterých reakce proběhla. Ovlivňujícími faktory jsou zejména množství aluminosilikátů obsažených v prekurzoru, množství, druh a koncentrace aktivátorů, množství přidané záměsové vody a podmínky zrání. [6,7]

Obrázek níže znázorňuje zjednodušený princip geopolymery. [6]



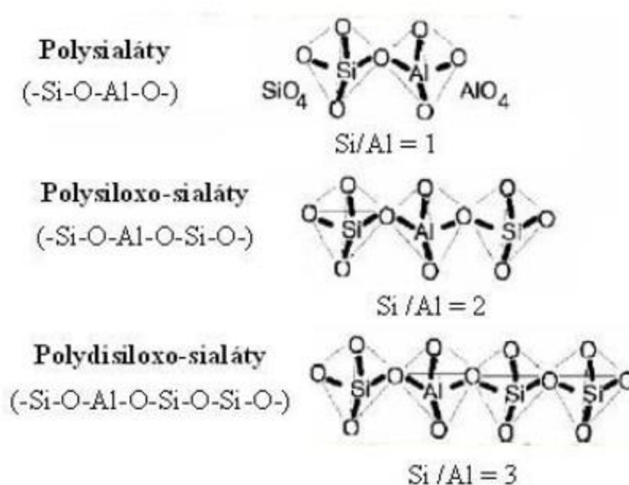
Obrázek 4: Zjednodušený princip geopolymery [6]

Princip geopolymery tak lze rozdělit do několika fází. První fáze je založena na rozpouštění aktivních složek z původního materiálu pomocí hydroxylových iontů. Při styku výchozího produktu (kalcinovaného materiálu) s alkalickým roztokem dojde k rozpouštění SiO_2 a Al_2O_3 . Výchozí produkt pak do alkalického roztoku přechází v podobě křemičitanu a tetrahydroxyhlinitanu. Intenzita rozpouštění je závislá na koncentraci alkalického roztoku, na složení kalcinovaného materiálu a na kationtu alkalického kovu v zásaditém roztoku.

Druhá fáze je založena na tvorbě oligomerů kondenzační nebo autokondenzační reakcí. Po rozpouštění části SiO_2 a Al_2O_3 z povrchu, dochází k difuzi části atomů Si a Al do gelové fáze. Následně dojde ke snížení koncentrace těchto složek na povrchu hlinito-křemičitých částic, což vede k dalšímu rozpouštění SiO_2 a Al_2O_3 .

Třetí fáze je založena na polykondenzaci s postupným síťováním celého systému. Do reakce se zapojuje skupina SiO_2 , která podléhá polykondenzaci s hlinitanem do doby, než se Al_2O_3 rozpustí z povrchu hlinito-křemičitého materiálu. Polykondenzace je v této fázi ovlivněna vyšší teplotou, vyšším pH a velikostí atomu kationtu alkalického kovu. [24]

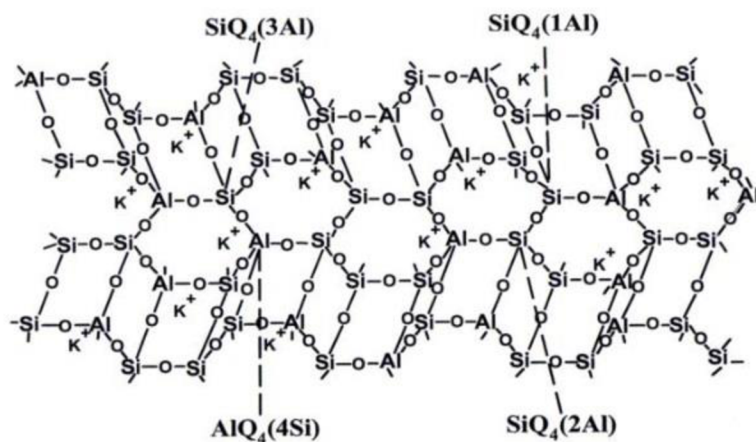
Při alkalické aktivaci dochází ke vzniku trojrozměrné aluminosilikátové sítě, která je tvořena tetraedry SiO_4 a AlO_4 spojenými kyslíkovými můstky. Kladné ionty (Na^+ , K^+ , Li^+ , Cs^+ , Ca^{2+} , Na^+) vyrovnávají záporný náboj Al, tyto ionty bývají přítomné v dutinách polymerní kostry. Zdroje uvádí, že při vzniku nových fází během rozpouštění a polykondenzace, je velmi důležitým ukazatelem poměr pevné a kapalné fáze. Krystalické produkty, které se podobají zeolitům, bývají vytvořeny ze zředěných suspenzí ($w > 1-10$), amorfni produkty jsou vytvořeny ze vstupních surovin, které mají vyšší koncentrace ($w < 1$). Pro amorfni produkty byla prof. Davidovitzem zavedena speciální terminologie řídicí se vzájemným poměrem Si a Al. Pokud je poměr $\text{Si}/\text{Al} = 1$, pak jsou geopolymery nazývány polysialáty. Pokud je poměr $\text{Si}/\text{Al} = 2$, geopolymery jsou nazývány polysiloxo-sialáty. Poslední případ nastává, pokud je poměr $\text{Si}/\text{Al} = 3$, pak se geopolymery nazývají polydisiloxo-sialáty. Struktury těchto amorfni fází geopolimerů jsou znázorněny na obrázku níže. [24]



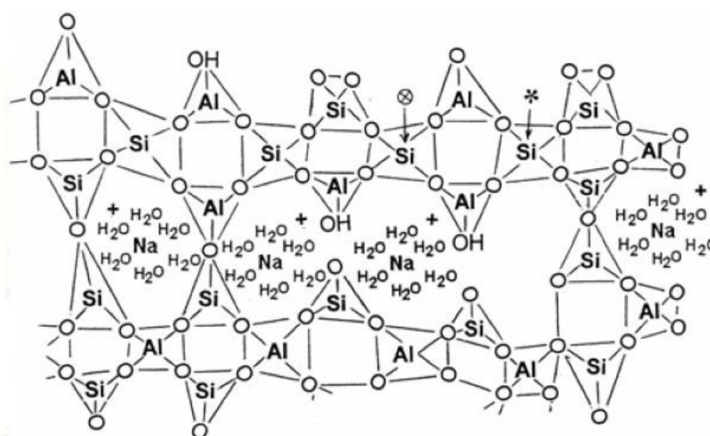
Obrázek 5: Názvy a struktury amorfni fází geopolimeru [24]

Davidovitz navrhnul strukturální model geopolimeru typu polysiloxo-sialát, jehož vstupní surovinou byl metakaolin. Předpokládaná struktura je monolitická, podobná organickým polymerům (Obr. 6). Využitím metod, které zkoumají mikrostrukturu (termická

analýza, rtuťová porozimetrie, MAS NMR spektroskopie) byl vytvořen aktuální model mikrostruktury AAM (Obr. 7). [24]



Obrázek 6: Struktura geopolymery podle Davidovitz [24]

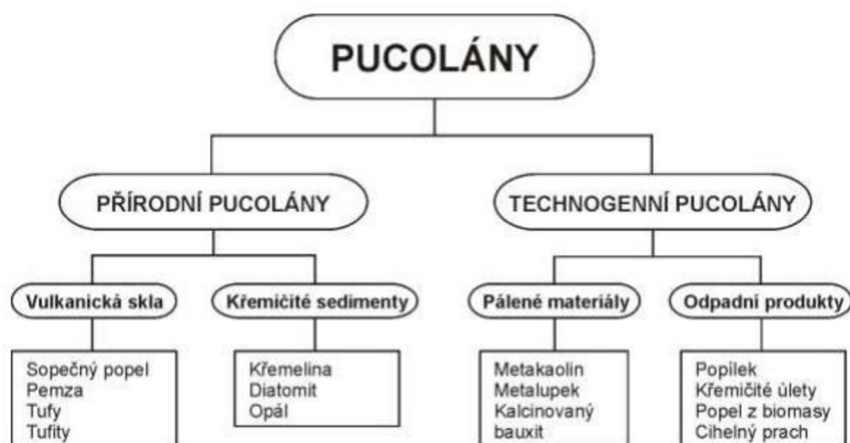


Obrázek 7: Aktuální pohled na strukturu AAM [24]

2.2. Materiály pro alkalickou aktivaci

Pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů je potřeba surovin s vysokým obsahem aluminosilikátů v amorfní fázi. Takovými materiály jsou například některé pucolány. Obecně jsou pucolány křemičité nebo hlinitokřemičité materiály, které samy o sobě nevykazují žádné pojivové vlastnosti, ale pokud jsou v jemně mleté formě a v přítomnosti určité vlhkosti, reagují s hydroxidem vápenatým při běžných teplotách za vzniku sloučenin, které už pojivové vlastnosti vykazují. Pucolány se dají rozdělit na přírodní, jako jsou například vulkanická skla a křemičité sedimenty, a na pucolány technogenní, což jsou pálené materiály (např. metakaolin) a odpadní produkty.

Pro přípravu alkalicky aktivovaných materiálů lze kromě vhodných přírodních surovin použít také velkoobjemově produkované druhotné suroviny, které jsou dnes využívány jako příměsi do cementu díky svým pucolánovým nebo latentně hydraulickými vlastnostem. Využití právě druhotných surovin přináší jak ekonomické, tak i ekologické výhody spjaté zejména s nižšími výrobními náklady na zdroj tepla, nižší spotřebou paliva a snížením produkce CO₂. V poslední době je snaha využít také jiné materiály bohaté na křemík a hliník, jako jsou přírodní zeolity – bentonit, odpadní kaolin a jiné.



Obrázek 8: Pucolány [12]

2.2.1. Vysokopecní struska

Vysokopecní struska patří do skupiny metalurgických strusek. Vzniká z přísad přidávaných do vysoké pece, jako vedlejší produkt při výrobě železa. Roztavená struska má mnohem nižší specifickou hmotnost, okolo 2800 kg/m³, než surové železo, jehož specifická hmotnost je kolem 7000 kg/m³. Proto plave na roztaveném železe, a tak jej chrání před oxidací. Teplota taveniny se pohybuje v intervalu teplot 1350–1550 °C. Na 1 tunu železa připadá 0,5 – 2,1 t strusky. Po vypuštění z vysoké pece se ztuhlá struska chladí, a to pomalu nebo rychle. Pomalu chlazená struska je krystalická, drtí se a slouží jako náhrada kameniva v silničním stavitelství. Nevykazuje latentně hydraulické vlastnosti. Naopak rychle chlazená struska má amorfni charakter a je označována jako struska granulovaná. Vykazuje latentně hydraulické vlastnosti, tzn. že v přítomnosti aktivátoru reaguje za vzniku hydrosilikátů a hydroaluminátů vápenatých nebo hořečnatých. Obsah amorfni fáze závisí na rychlosti ochlazování. Granulovaná struska se obvykle mele, měrný povrch namleté strusky se

pohybuje v intervalu $360\text{--}440\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ a používá se zejména jako příměs do směsných cementů nebo jako materiál pro alkalicky aktivovanou strusku (AAS). [8,9]

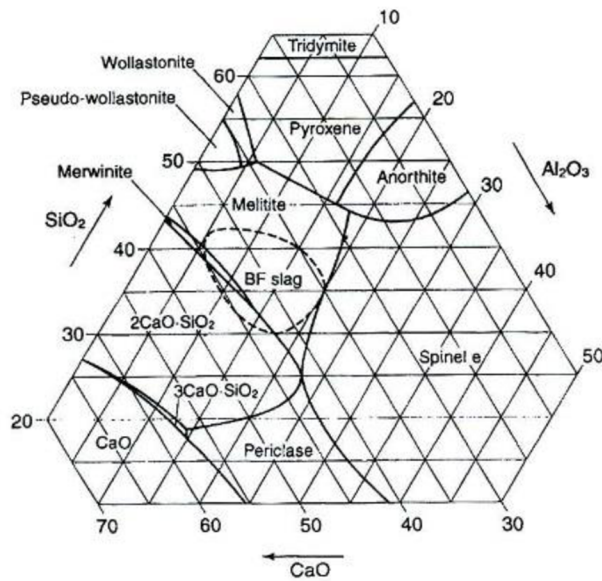
Důležitými faktory, které je nutné sledovat při použití strusky, je její chemické a mineralogické složení. Chemické složení může být proměnlivé v závislosti na původu tavené rudy, složení vápencového tavidla, množství spalovaného koksu a druhu produkovaného železa. V tabulce č. 2 níže je uvedeno průměrné složení vysokopecní strusky. Pomalu chlazená struska obsahuje zejména krystalické Ca-Al-Mg silikáty.

Tabulka 3: Mineralogické složení strusky [10]

| Názvy minerálů | Chemický vzorec | Zkratka |
|-------------------|--|---|
| Melilit | $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2 + 2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ | $\text{C}_2\text{AS} + \text{C}_2\text{MS}_2$ |
| Merwinit | $3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ | C_3MS_2 |
| Dikalcium silikát | $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ | C_2S |
| Rankinit | $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ | C_3S_2 |
| Wollastonit | $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ | CS |
| Diopsid | $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ | CMS_2 |
| Monticellit | $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ | CMS |
| Spinel | $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ | MA |
| Magnesium silikát | $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ | M_2S |
| Sulfidy | $\text{CaS}, \text{MnS}, \text{FeS}$ | |
| Další | $\text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3$ | |

Z mineralogického hlediska dále obsahuje vysokopecní struska až 40 různých minerálů. Mezi nejvýznamnější minerály patří melilit, což je tuhý roztok akermanitu (C_2MS_2) a gehlenitu (C_2AS), merwinit (C_3MS_2), monticelit (CMS), diopsid (CMS_2), larnit ($\beta\text{-C}_2\text{S}$), pseudowollastonit ($\alpha\text{-CS}$), rankinit (C_3S_2), anortit (CAS_2), spinel (MA), forsterit (M_2S), a dále také sulfidy ($\text{CaS}, \text{MnS}, \text{FeS}$) a oxidy ($\text{FeO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2$).

Chemické složení granulovaných strusek může být vyjádřeno ve čtyřfázovém diagramu C-S-A-M, nebo zjednodušeně ve třífázovém diagramu C-S-A za předpokladu, že obsah MgO je konstantní. Třífázový diagram je znázorněn na obrázku níže. [9]



Obrázek 9: Třífázový diagram $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ chemického složení vysokopecní strusky při obsahu $\text{MgO} = 10\%$ (převzato ze Satarin, 1974) [9]

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje výběr vhodné strusky pro AAM, je její reaktivita. Ta závisí především na fázovém složení strusky a zejména pak na obsahu sklené fáze, díky níž má granulovaná struska dostatečnou vnitřní energii podmiňující její reaktivitu. Reaktivitu lze hodnotit z různých hledisek, jedním z nich je posouzení tzv. stupně depolymerace (DP), který je definován jako molární poměr volného CA a Si. Stupeň depolymerace lze popsat následovně:

$$DP = \frac{n(\text{CaO}) - 2n(\text{MgO}) - n(\text{Al}_2\text{O}_3) - n(\text{SO}_3)}{n(\text{SiO}_2) - 2n(\text{MgO}) - 0,5n(\text{Al}_2\text{O}_3)}$$

Pro granulovanou strusku je hodnota DP pohybuje v rozmezí 1,3 – 1,5. Vyšší hodnota signalizuje více depolymerovaný, tedy více reaktivnější systém. [10]

Hydraulická aktivita se měří také tzv. indexem bazicity, jenž vyjadřuje poměr zásaditých a kyselých složek ve strusce. Index bazicity lze stanovit ze vzorce:

$$K_b = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$$

Podle indexu bazicity se pak strusky dělí na strusky zásadité, s $K_b > 1$, strusky neutrální ($K_b = 1$) a strusky kyselé ($K_b < 1$). Zdroje uvádějí, že pro alkalickou aktivaci jsou nejvhodnější strusky zásadité nebo neutrální. [10]

Reaktivitu také ovlivňuje velikost částic. Částice strusky nad 20 μm reagují velmi pomalu, zatímco částice menší než 2 μm jsou schopny kompletně zreagovat během prvních 24 hodin. Z toho vyplývá fakt, že pokud bude sledována distribuce a velikost částic strusky použité pro alkalickou aktivaci, projeví se to na výsledných pevnostech AAM. [11]

2.2.2. Elektrárenský popílek

Elektrárenský popílek vzniká jako vedlejší energetický produkt při spalování uhlí. Získává se elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním prachových částic z kouřových plynů. Popílek může mít různé chemické a fázové složení, které závisí na typu a metodě spalování. Uhlí z jednoho zdroje užívané ve stejné elektrárně bude tedy poskytovat téměř stejný popílek, ale chemické složení popílků z různých elektráren se značně liší. Svou podstatou jsou popílků křemičité nebo vápenaté. Křemičitý popílek má pucolánové vlastnosti, popílek vápenatý může mít i hydraulické vlastnosti.

Podle vzniku lze popílků rozdělit do dvou typů, a to na popílků z klasického spalování a popílků z fluidního spalování. Popílků třídy F jsou kyselé a obsahují velmi málo Ca, obsah SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 je větší než 70 %. Jsou označovány jako křemičité popílků. Tyto popílků vznikají vysokoteplotním spalováním uhlí při teplotách 1400–1600 °C. Zbývající materiál, který se nachází v uhlí, jsou lupky a hlíny, které obsahují převážně SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Sférické částice popílků jsou unášeny proudem kouřových plynů. Ostatní zbytků z uhlí pak padají na dno kotle, kde se spékají na hrubší materiál – ložový popel. [9]

Popílků třídy C jsou naopak zásadité, obsahují značné množství Ca, obsah SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 je zpravidla v rozmezí 50–70 % a vznikají v elektrárnách a teplárnách při fluidním spalování při teplotě 850 °C. Jsou označovány jako popílků vápenaté. Produktem spalování při nižších teplotách než vysokoteplotní spalování, je směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s případnými zbytků CaCO_3), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Nezreagovaný CaO je zde přítomen ve formě měkce páleného vápna a tím ručí za reaktivitu fluidního popílků. Pro přípravu AAM se fluidní popílků příliš nepoužívají, protože vyžadují namletí na jemnější frakci. [9, 12]

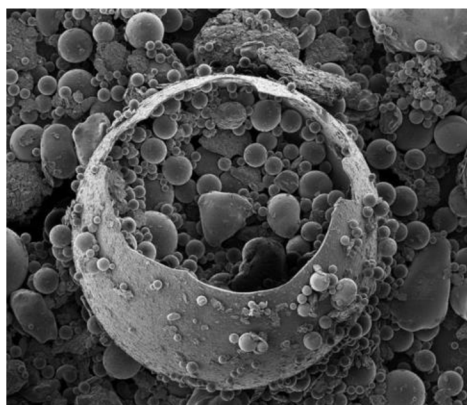
Hlavní krystalickou složkou popílků je křemen (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), magnetit (Fe_3O_4) a hematit (Fe_2O_3). Vápenaté popílků mohou obsahovat volné vápno, trikalciualuminát (C_3A), dikalciumsilikát (belit, C_2S) a anhydrit (CaSO_4). Méně zastoupenými fázemi v popílcích jsou merwinit ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) a melilit, což je tuhý roztok gehlenitu a akermanitu. Zbytkový uhlík nepřesahuje 3 %, ve zvláštních případech 10 %. Fáze přítomné v popílcích po spalování jsou uvedeny v tabulce 3 níže. [9]

Tabulka 4: Fáze přítomné v popílcích

| Nejběžnější minerály | Fáze vytvořené po spalování uhlí | | |
|----------------------|----------------------------------|------------------------|-------------|
| | 850 °C | 1 500 °C | 1 800 °C |
| Křemen | křemen | krystobalit | skelná fáze |
| Kaolinit | metakaolin | skelná fáze + mulit | skelná fáze |
| Illit | illit | skelná fáze + mulit | skelná fáze |
| Pyrit | FeS/FeO | hematit + skelná fáze | skelná fáze |
| | | magnetit + skelná fáze | |
| Kalcit | CaO | skelná fáze | skelná fáze |

Reaktivita popílků závisí na přítomnosti skelné fáze, která je závislá na teplotě spalování a na spalovaném druhu uhlí. Skelná fáze vzniká rychlým chlazením taveniny a představuje více jak 60 % popílku. Pucolánové vlastnosti jsou dány schopností skelné fáze reagovat s hydroxidem vápenatým.

Částice popílku mohou mít různý tvar, závislý na teplotě spalování. Čím je teplota vyšší, tím jsou částice pravidelnějšího tvaru. Nejčastěji jsou částice popílku kulovitěho tvaru. Při nižších teplotách jsou tvořena nepravidelná zrna, často s nižším obsahem taveniny. Na povrchu zrn se mohou nacházet zbytky alkálií a síranů. Pravidelná kulovitá zrna jsou označována jako mikrosféry. Asi 20 % částic popílku je dutých, vyplněných spalinami. Takové částice se nazývají cenosféry. Některé duté částice jsou vyplněny menšími cenosférami, pak jsou označovány jako plerosféry. Ojedinelý je výskyt plných sférických částic, většinou jde o částice kovového Fe a Si. Velikost částic se pohybuje v rozmezí 0,5 – 150 μm . Velmi ojedinelé se můžeme setkat s částicemi velkými až 1 mm. Měrný povrch se pohybuje často mezi 200–400 m^2/kg . Při mletí částice popílku praskají a vytvářejí skořápkovité úlomky z původních cenosfér. [9, 12]



Obrázek 10: Částice popílku – plerosféra vyplněná cenosférami menších rozměrů [13]

Hydratačními produkty skelné fáze, hydroxidu vápenatého a vody, které podstupují pucolánovou reakci, jsou amorfni C-S-(A)-H fáze. Vznikají za běžných teplot a vlivem jejich rozvoje dochází k tuhnutí a tvrdnutí past. OH⁻ ionty rozbíjí strukturu SiO₂-Al₂O₃, po rozbití dostatečného množství Si-O-Si (nebo Si-O-Al) vazeb jsou silikátové a aluminátové ionty odděleny ze strukturní sítě, mohou začít reagovat s hydroxidem vápenatým a H₂O za vzniku amorfni kalciumsilikátaluminátové fáze. [9, 12]

2.2.3. Metakaolin

Metakaolin je považován za základní surovinu pro výrobu geopolymérů. Řadí se mezi primární produkty, to znamená, že není odpadní surovinou průmyslové výroby. Uplatnění nachází také ve výrobě vysokohodnotných žárovzdorných betonů. Výroba spočívá v kalcinaci kaolinitických jíílů, lupků a jiných vhodných surovin, které obsahují vysoké množství kaolinitu. Kalcinace probíhá při teplotě 600–800 °C. Metakaolin má pucolánové vlastnosti, které jsou závislé na čistotě a krystalinitě kalcinovaných jíílů. Největší pucolánovou aktivitu vykazuje metakaolin připravený mezi teplotami 600–900 °C, nad teplotou 900 °C se vytváří defektní spinel (Si₃Al₂O₁₂) a následně krystalický mullit (Al₆Si₂O₁₃), případně cristobalit (SiO₂). Reaktivita metakaolinu tak se zvyšující se teplotou kalcinace klesá. [12, 14]

Další z možností, jak získat metakaolin, je kalcinace lateritických půd za teplot 750–800 °C. Tyto půdy obsahují velké množství oxidů a hydroxidů železa, hliníku, titanu, manganu a kaolinitu. Vznikají zvětráváním hornin, které obsahují zejména silikáty.

Některé zdroje uvádějí, že metakaolin lze získat také kalcinací odpadního kalu z průmyslu recyklace papíru. [15, 16] Proces kalcinace jílu bohatých na kaolinit je znázorněn níže:

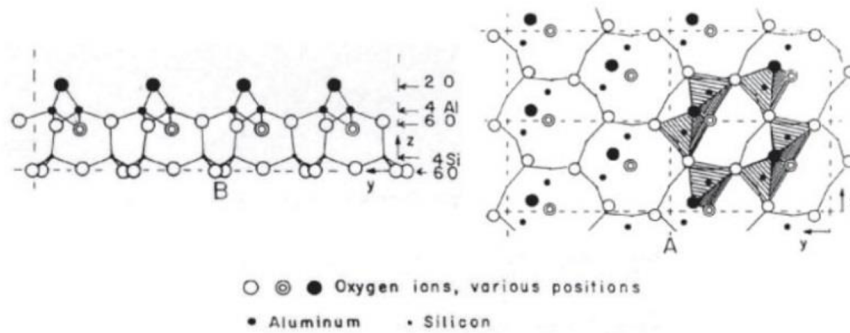


Obrázek 11: Schéma kalcinace kaolinitu [14]

Použitím metakaolinu v cementové pastě je docíleno vzniku hydratačních produktů, které jsou schopny reakce s hydroxidem vápenatým. Vznikají zejména produkty na bázi C-S-H gelů a C_2ASH_8 (minerál stratlingit), což vede k rozvoji hutnější mikrostruktury a též ke zvýšení pevností materiálu. Velikost částic metakaolinu se pohybuje kolem 5 μm , podle použité suroviny může velikost částic dosáhnout i 20 nm. Měrný povrch metakaolinu se pohybuje od 2000 do 20000 m^2/kg , což přispívá ke snížení propustnosti kompozitního systému, ve kterém je metakaolin použit. [14, 17]

Metakaolin vzniká dehydroxylací krystalů kaolinitu. Struktura kaolinitu je složena ze střídajících se tetraedrů a oktaedrů AlO_6 a SiO_4 . Čím více hexakoordinovaného hliníku přejde při kalcinaci na tetra- a pentakoordinovanou strukturu, tím je metakaolin reaktivnější. Pokud se hliník nachází v hexakoordinovaném stavu, znamená to přítomnost OH skupin, které nebyly kalcinací odstraněny. [14]

Metakaolin je materiál, jehož struktura je odbornou veřejností považována za defektní. Ideální struktura navržená Brindleym a Nakahirou [17] je zobrazena níže na obrázku 12. Chemické složení metakaolinů vyráběných u nás je přibližně 55 % SiO_2 , 40 % Al_2O_3 , 0,5-3,5 % Fe_2O_3 , 0,5-1,4 % TiO_2 , 0,1-0,4 % CaO , 0,2-0,5 % MgO , 0,01-1,0 % Na_2O , 0,6-1,7 % K_2O . Ztráta žíháním se pohybuje od 0,4 – 3,1 %. [12]



Obrázek 12: Idealizovaná struktura metakaolinu [17]

2.3. Alkalické aktivátory

Při použití vhodného alkalického aktivátoru vzniká pevná hmota, která vykazuje významné pojivové vlastnosti. Nejčastěji se jedná o sloučeniny alkalických kovů, tedy sodíku, draslíku a dalších. Tyto aktivátory mohou být ve formě křemičitanů, uhličitanů, hydroxidů nebo jejich kombinace. Glukhovskij [12, 18] rozdělil aktivátory do šesti skupin:

1. Hydroxidy – MOH;
2. Soli slabých kyselin – M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF, atd.;
3. Křemičitany – $M_2O \cdot nSiO_2$;
4. Hlinitany – $M_2O \cdot nAl_2O_3$;
5. Hlinitokřemičitany – $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$;
6. Soli silných kyselin – M_2SO_4 .

Mezi nejběžněji používané alkalické aktivátory se řadí hydroxidy, soli slabých kyselin a vodní sklo. Vlastnosti alkalicky aktivovaného materiálu závisí na mnoha faktorech, s alkalickými aktivátory je spjata zejména jejich hodnota pH, druh a množství. V [19] byl studován vliv pH na pevnosti geopolymerního materiálu na bázi jak popílků, metakaolinu tak strusky. Tělesa byla zatěžována ve stáří 7 dní. Výsledky ukázaly, že zkušební vzorky vyrobené s $pH = 14$ vykazovaly téměř 50x větší pevnost v tlaku než vzorky vyrobené s $pH = 12$. Tento výkyv je ovlivněn jednak tím, že se zvyšující se hodnotou pH aktivátoru dochází k tvorbě krátkých řetězců oligomerů a monomerních silikátů, a jednak faktem, že se zvětšuje množství hlinitanových aniontů, které se rozpouštějí z původního aluminosilikátového materiálu. Tyto faktory značně ovlivňují geopolymerní reakci.

Kromě pH má na pevnost AAM podstatný vliv také druh a množství použitého aktivátoru. Sodné a draselné kationty mají odlišné velikosti, menší kationt podporuje tvorbu malých silikátových oligomerů a proto bude více aktivnější a tím bude mít lepší rozpouštěcí schopnost. Jelikož K^+ kationty mají menší hydratační povrch než Na^+ , dochází proto k polykondenzačním reakcím, které vytvářejí hustější strukturu, což má za následek vyšší pevnost matrice. [19]

2.3.1. Vodní sklo

Jako vodní sklo je zpravidla označován koloidní roztok alkalických křemičitanů (sodík, draslík, lithium). Dostupná vodní skla obsahují obvykle 35–45 hmot. % sušiny, u lithného vodního skla je obsah sušiny menší, v rozmezí 20–30 hmot. %. Důležitým ukazatelem při výběru vodního skla pro alkalickou aktivaci je jeho silikátový modul. Je to v podstatě molární poměr SiO_2 a Me_2O (Na_2O , K_2O). Komerčně užívaná vodní skla mají silikátový modul v rozmezí hodnot 1,6 – 3,85. Dalším důležitým parametrem je hustota, viskozita a pH vodního skla. Hustota poskytuje informaci o koncentraci roztoku vodního skla i o složení výchozí suroviny pro jeho přípravu. Viskozita závisí zejména na koncentraci vodního skla a na silikátovém modulu výchozí suroviny. [8, 12]

Vodní skla se vyrábějí buď ve formě roztoku nebo ve formě pevné sytké hmoty. Pevné vodní sklo bývá označováno jako PKS/D (pevný křemičitan sodný/draselný). Vyrábí se mletím sodnokřemičité frity s molárním poměrem 2,0 – 3,6.

Sklářský písek (oxid křemičitý, s čistotou 70-75 %) se taví ve sklářské vanové peci při teplotě 1400–1600 °C za přídavku alkalických tavidel. Tavidla jsou látky, které usnadňují tavení písku, nejčastěji se jedná o sodu (oxid sodný) nebo potaš (oxid draselný). Roztavená sklovina se prudce chladí za účelem rozpraskání na co nejmenší části. Tím je docíleno co nejsnazšího rozpouštění. Sodnokřemičité sklo je dobře rozpustné ve vodě, rozpustnost je pohybuje v rozmezí 30–60 %. Takto připravený materiál se pomocí hydroxidu sodného (nebo draselného) a s vodou autoklávuje za zvýšené teploty a tlaku. Výsledným produktem je tekuté vodní sklo. Proces autoklávování trvá asi 3–4 hodiny v závislosti na velikosti autoklávu. Při autoklávování se rozpustnost zvýší. Poté je vodní sklo přetlačeno do zásobníku.

Dalším technologickým postupem výroby vodního skla je hydrotermální syntéza. Je to reakce křemičitého písku s vysoce alkalickým roztokem hydroxidu sodného. Obsah NaOH se pohybuje v rozmezí 30–50 %. [25, 12]

2.3.2. Hydroxidy

Hydroxidy lze použít jako samostatný alkalický aktivátor, ale většinou se používají jako modifikátory upravující silikátový modul vodních skel. Nejběžněji používanými hydroxidy jsou NaOH a KOH.

Hydroxid sodný neboli NaOH, je silně zásaditá anorganická sloučenina. Vyrábí se elektrolýzou vodného roztoku NaCl. Na trhu je k dostání ve formě roztoku, nebo ve formě peciček, šupinek nebo granulí. NaOH je silně hygroskopický, ze vzduchu váže CO₂, proto je nutné jej uchovávat v uzavřených nádobách. Při teplotě 20 °C má hustotu 2,13 g/cm³ a rozpustnost asi 1100 g/l. Teplota tání je uváděna na 318 °C. Při rozpouštění ve vodě uvolňuje hydroxid sodný velké množství tepla, se zvyšující se koncentrací uvolněné množství tepla klesá. S vodou vytváří NaOH 6 hydrátů, je zcela disociován na sodné kationty a hydroxylové aniony. Výsledný vodný roztok je bezbarvý, bez zápachu. Použití hydroxidu sodného jako aktivátoru do AAM zvyšuje tvorbu výkvětů. [12, 20]

Hydroxid draselný je bílá látka, podobá se hydroxidu sodnému. Je to silně zásaditá sloučenina, hygroskopická, velmi dobře rozpustná ve vodě a nižších alkoholech. Stejně jako u NaOH, při rozpouštění KOH ve vodě dochází k silné exotermní reakci, při níž se teplota roztoku může zvýšit až o 100 °C. Vyrábí se elektrolýzou z roztoku chloridu draselného, vedlejším produktem je plynný chlór. Použití KOH jako alkalického aktivátoru se podílí na tvorbě výkvětů, ale v menší míře, než je tomu u NaOH. [21]

2.3.3. Soli slabých kyselin

Mezi soli slabých kyselin jsou řazeny například soli kyseliny uhličitě (uhličitan), které jsou s výjimkou uhličitanu draselného, sodného a amonného téměř nerozpustné ve vodě. Rozkládají se působením silnějších kyselin, než je samotnější kyselina uhličitá. Pro výrobu AAM se používají zejména uhličitan sodný, draselný, lithný a amonný.

Uhličitan sodný, Na_2CO_3 , triviálně nazývaný soda, je anorganická sloučenina sodné soli kyseliny uhličitě. Jde o bílý prášek, snadno se rozpouštějící ve vodě. Při rozpouštění ve vodě je reakce doprovázena uvolněním hydratačního tepla. Synteticky se vyrábí Solovayovým způsobem z chloridu sodného, nebo kalcinací tróny ($\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). [22]

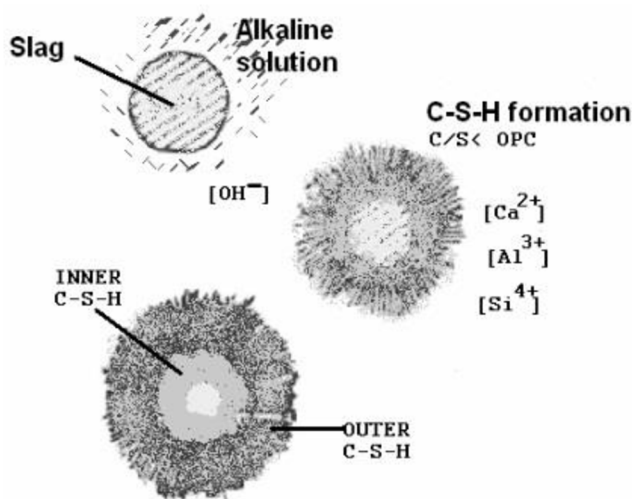
Uhličitan draselný, K_2CO_3 , byl pod starším názvem znám jako potaš. Jedná se o bílou, silně hygroskopickou sůl kyseliny uhličitě, které se vyrábí elektrolýzou chloridu draselného. Nejprve vzniká hydroxid draselný, který se sytí oxidem uhličitým, pak vzniká uhličitan draselný. [23]

2.4. Alkalicky aktivovaná struska

Hydrataci vysokopecní strusky lze urychlit právě použitím vhodného alkalického aktivátoru, při tomto procesu se zvyšuje uvolňované hydratační teplo. Rychlost hydratace závisí na množství a typu aktivátoru. Zatímco při hydrataci strusky samotnou vodou nejsou patrné žádné změny na povrchu částic strusky ani po 24 hodinách, v případě alkalické aktivace lze pozorovat již po 20 minutách naleptání povrchu částic a koagulaci hydratačních produktů ve volném prostoru mezi jednotlivými částicemi strusky. I přes fakt, že alkalická aktivace urychlí proces hydratace, lze i po delším čase nalézt v takto aktivované strusce některá nezhydratovaná zrna. Nejčastěji se vysokopecní struska aktivuje pomocí NaOH , Na_2CO_3 nebo sodným vodním sklem. Obsah aktivátoru se pohybuje kolem 2–7 hm. % z hmotnosti strusky. Pro lepší zpracovatelnost směsi a výsledné vlastnosti se může ke strusce přidat také popílek, mletý vápenec nebo mikrosilika. Přídavek práškového Fe zlepšuje chemickou odolnost AAS.

V prostoru mezi zrny strusky, který je vyplněný alkalickým aktivátorem, se začínají tvořit první hydratační produkty. Primárním produktem je C-A-S-H gel se strukturou podobnou tobermoritu. Tento hydratační produkt se podobá C-S-H gelu, který vzniká při hydrataci portlandského cementu, avšak má ve struktuře navíc hlinitanové tetraedry. Hliník je vždy v můstkové pozici. Na^+ ionty se nacházejí ve struktuře AAS ve třech formách: vázané v C-A-S-H fázi, kde kompenzují záporný náboj Al, dále jsou ionty fyzikálně adsorbované na povrchu hydratačních produktů, anebo jsou volné v pórovém prostoru, což zapříčiňuje tvorbu výkvětů. Mezi vedlejší produkty hydratace patří hydrotalcit

($Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4(H_2O)$), C_4AH_{13} , C_2ASH_8 , $Ca(OH)_2$ a CS_2H . Množství a typ vedlejších hydratačních produktů závisí na druhu alkalického aktivátoru a na složení použité strusky. Teoretický model reakčního mechanismu AAS je znázorněn na obrázku níže.



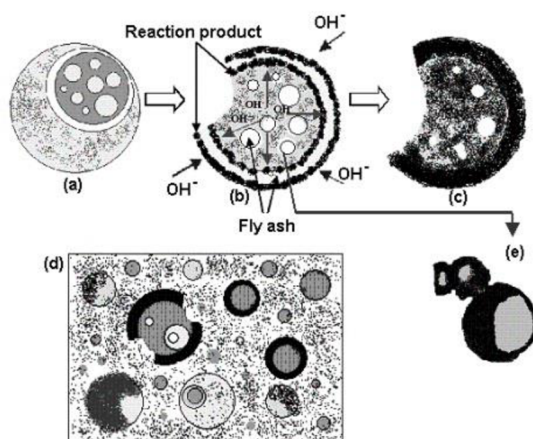
Obrázek 13: Teoretický model reakčního mechanismu AAS [27]

Pokud je struska aktivována pouze pomocí NaOH, struktura C-A-S-H fáze je pravidelnější, vyšší je poměr Ca/Si. Vzniká minerál stratlingit. Ve strusce aktivované vodním sklen je vytvořena vysoce amorfni struktura C-A-S-H gelu, poměr Ca/Si je nižší. Rovněž vzniká stratlingit. Zatím nejméně prozkoumaným mechanismem je aktivace strusky pomocí např. Na_2CO_3 . Je akorát známo, že struktura C-A-S-H je v tomto případě rozvětvená a poměr Ca/Si je velmi nízký. Vznikají směsné uhličitany, např. $Na_2Ca(CO_3)_2 \cdot 5H_2O$. [26, 12]

2.5. Alkalicky aktivovaný popílek

Stejně jako u AAS, i v případě alkalicky aktivovaného popílku hraje důležitou roli chemické složení vstupní suroviny, množství aktivátoru, silikátový modul, vodní součinitel a také způsob ošetřování. Některé výzkumy byly zaměřeny na vlastnosti alkalicky aktivovaného popílku, který byl vytvrzován za vyšších teplot. Samozřejmě je možné také zrání při laboratorní teplotě.

Ve studii [28] byl představen dvoustupňový model alkalické aktivace popílku, který byl založen na principu syntézy zeolitů. V prvním stupni dochází k rozpouštění aluminosilikátů, které následně tvoří iontové komplexy. Ty se pak rozvíjejí do větších útvarů. Konečným produktem je amorfní aluminosilikátový N(K)-A-S-H gel. Chemickým působením aktivátoru je rozbita slupka zrna popílku, do které se posléze dostává alkalický aktivátor. Cenoféry, které se nacházejí uvnitř zrna cementu, tak také přicházejí do styku s alkalickým aktivátorem. Reakční produkty tak vznikají jak na povrchu zrn, tak i uprostřed částice. Tento proces trvá, dokud není celá částice zreagovaná. Některé částice však ale alkalickou aktivací vůbec nemusejí projít a zůstanou tak nezreagované. Dvoustupňový model je znázorněn na obrázku 14. Hlavními produkty alkalické aktivace popílku jsou tedy N(K)-A-S-H gely. Jako vedlejší produkty mohou vznikat minerály chabazit, paranatrolit, fajuasit a další. [27]



Obrázek 14: Dvoustupňový model alkalické aktivace popílku [28]

2.6. Alkalická aktivace strusky s přidavkem popílku

Předmětem výzkumu byl kromě alkalické aktivace samotného popílku nebo strusky také systém vytvořený kombinací právě strusky a popílku. Vlastnosti jsou, stejně jako v případě ostatních AAM, závislé na vstupních surovinách a na druhu použitého alkalického aktivátoru. V práci Dai a Chenga [29] byl zkoumán vliv alkalického aktivátoru na vlastnosti výsledného materiálu. Porovnáván byl vliv NaOH a vodního skla jako aktivátoru. Studie prokázala, že vyšších pevnostních charakteristik dosahovala směs aktivovaná vodním sklem. V jiné studii [30] byl zase prokázán opak. Směs aktivovaná sodným vodním sklem

nedosahovala takových pevností, jako směs aktivovaná pomocí NaOH. Z těchto poznatků lze vyvodit závěr, že nelze jednoznačně určit nejvhodnější alkalicky aktivátor pro směs popílku a strusky. Každý popílek i struska vyžadují různé druhy aktivátorů.

Mikrostrukturní analýzou byly zjištěny dva druhy reakčních produktů. Stejně jako u samostatně alkalicky aktivované strusky byla zjištěna přítomnost C-A-S-H gelu bohatého na Al, který ve své struktuře obsahuje alkalické ionty. Křemičité tetraedry jsou vázány s vrstvou Ca – O, kdy jsou spojovány Al iontem., který se nachází ve formě tetraedru. To přispívá k zajištění hutné struktury matrice. Reakční produkt, který se vytváří na povrchu zrn popílku, je amorfni alkalický aluminosilikátový hydrát, N(K)-A-S-H gel. Svou strukturou připomíná zeolity. [31]

2.7. Chování AAM za vysokých teplot

Chování různých druhů alkalicky aktivovaných materiálů po zatížení vysokými teplotami je velmi rozdílné. Tento poznatek je spjat s rozdílnými strukturami hydratačních produktů. Alkalicky aktivovaná struska obsahuje více Ca, hydratačním produktem jsou C-A-S-H gely, kdežto alkalicky aktivovaný popílek, stejně jako geopolymerní materiál připravený z metakaolinu, vykazují prostorovou strukturu geopolymerní sítě. Při vystavení AAM vysokým teplotám dochází ke strukturním změnám, kdy AAS dehydratuje a rozkládá se akermanit. U AAP a geopolymery připravených z metakaolinu dochází ke slinování matrice z důvodu přítomnosti velkého množství alkálií, vzniká tak sklená fáze. Mullit obsažený v popílku ovlivňuje rychlost tvorby a množství skelné fáze. Zaznamenán je také vznik mikrotrhlin. [6]

Zatížení vysokými teplotami má také vliv na fyzikálně mechanické parametry AAM. Objemové změny se projeví smrštěním, které je u AAS téměř lineární. V [32] je uvedeno maximální smrštění vzorku AAS -6,6 % při 1200 °C, což je srovnatelné se smrštěním materiálu na bázi portlandského cementu. Objemová hmotnost se snižuje v důsledku ztráty hmoty, až do teploty cca 1000 °C, kdy přesáhne hodnotu referenčních směsí. Nejnižší hodnoty pevnosti v tlaku byly zaznamenány při 800 °C, nad teplotu 1000 °C se pevnosti v tlaku díky spékání a slinování matrice zvyšují až na 60 % referenční hodnoty. Velmi podobný trend má pevnost v tahu za ohybu.

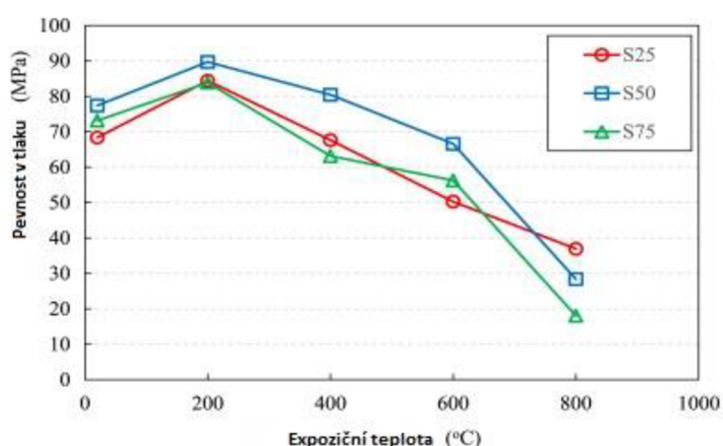
Oproti AAS má alkalicky aktivovaný popílek velmi rozdílné chování. Smrštění má obdobný charakter jako smrštění u strusky. Největší pokles u smrštění byl zaznamenán při teplotě 800 °C, při teplotě 1000 °C bylo smrštění těles největší. Vzorky AAP však nebyly schopny odolat teplotě 1200 °C, kdy se v peci během výpalu roztekly. Obecně AAP vykazuje nižší pevnosti v tlaku než AAS, je tomu tak i v případě pevností po teplotním zatížení. Nejvýraznější zvýšení pevnosti v tlaku nastalo u vzorků vystavených teplotě 1000 °C. Zvyšování pevností je pravděpodobně způsobeno dodatečnými reakcemi nezreagovaných zrn popílku. Následně může dodatečně vznikat další N-A-S-H gel, který strukturu materiálu vyplňuje a tím se snižuje i pórovitost celého materiálu. [33]

Rozdílné mineralogické složení použitého kameniva v alkalicky aktivovaném kompozitním systému, zejména pak tedy přítomnost minerálů, které podléhají fázovým přeměnám, může ovlivnit chování AAM vystavených vysokým teplotám. Například při použití křemenného písku byl zaznamenán pokles pevností, a to v důsledku fázových přeměn křemene. Naopak vyšší pevnosti byly zaznamenány při použití elektroizolačního porcelánu jako plniva, kdy při teplotě 1200 °C byly pevnosti v tahu za ohybu až 4,5x vyšší ve srovnání s referenčními hodnotami. [6]

Použitím pórovitého kameniva, například vermikulitu v kombinaci s elektroizolačním porcelánem, bylo docíleno zvýšení pórovitosti. Tento fakt může být považován za výhodu, neboť volný prostor může být při teplotním zatěžování vyplňován novými hydratačními produkty AAM. Ke zhroucení struktury vermikulitu došlo při teplotě 1150–1200 °C, což vedlo i ke snížení pórovitosti. Pevnost v tlaku se zvyšující se teplotou klesala až do 800 °C, kdy pokles pevností byl až o 60 %. Pak se hodnoty pevností v tlaku zvyšovaly, zřejmě v důsledku tvorby a růstu nové krystalické fáze akermanitu. Po expozici 1200 °C byly hodnoty pevnosti v tlaku přibližně o 30 % vyšší než hodnoty referenční. Výsledky zkoušek AAM převyšují hodnoty obyčejného silikátového kompozitu. [34]

V jiné studii [35] byl zkoumán vliv různého poměru strusky a popílku v alkalicky aktivovaných maltách. Malty byly vystaveny tepelné expozici při 200, 400, 600 a 800 °C. Obsah strusky byl vzhledem k popílku zkoušen v množství 25, 50 a 70 %, vzorky byly zkoušeny po 28 dnech zrání. Při zkoumání mikrostruktury bylo využito XRD. Se zvyšujícím se obsahem strusky byl zaznamenán vyšší obsah gehlenitu a nižší obsah anortitu. Lze dospět k závěru, že množství anortitu a gehlenitu je závislé na poměru Ca/Al v pojivových složkách. Rovněž bylo zjištěno, že obsah C-S-H gelu byl po expozici 800 °C téměř nulový,

což znamená, že se C-S-H gel plně krystalizoval nebo úplně dehydratoval. Pórovitost matrice se se zvyšujícím se obsahem strusky klesala, zajímavým pozorováním byl ale vzorek s 25 % strusky zatížený teplotou 800 °C, který dosahoval nejvyšší pórovitosti ze všech zkoušených vzorků. Obecně nejvyšších pevností v tlaku dosahovaly vzorky s 50 % strusky. Vzorky s 25 a 70 % strusky měly pevnosti v tlaku srovnatelné, ale při teplotě 800 °C vykazovaly nejvyšší pevnost vzorky s nejnižším obsahem strusky, a to okolo 28 MPa. Průběh pevností v tlaku v závislosti na zatěžovací teplotě je uveden v grafu níže. Nutno však podotknout, že zkoušeným AAM byla pouze pasta vytvořená z popílku, strusky, alkalického aktivátoru a vody.



Graf 1: Pevnost v tlaku AAM zhotoveného z popílku a strusky, vystaveného vysokým teplotám [35]

Jiná studie se zabývala porovnáním vlastností AAS a pasty z portlandského cementu (PC). AAS zrála ve dvou prostředích, v laboratorním a za zvýšené teploty (60 °C), po dobu 28 dní. Poté byly zkušební tělesa zatěžovány teplotami do 800 °C. Vytvrzovací režim je důležitým faktorem, který ovlivňuje výsledné vlastnosti AAM, avšak vzorky zhotovené v této studii tento předpoklad nepotvrdily. Nebyly zjištěny žádné významné rozdíly mezi pevnostmi v tlaku vzorků zrajících v laboratorních podmínkách a vzorků proteplováných. Po zatížení teplotou 800 °C byl úbytek pevností v tlaku u AAS i pasty z PC až 80%. Tahové pevnosti měly obdobný trend. Ke zkoumání mikrostruktury bylo opět využito XRD. U AAS byla prokázána přítomnost křemene, nephelinu, albitu, analcitu, hlinitokřemičitanu sodného $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{14}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ a minerálu sodalit (aluminosilikát Na a Cl). U PC byl přítomen kalцит, portlandit, anortit a C-S-H gel. [36]

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části byl návrh a posouzení kompozitního systému se silikátovou maticí odolného extrémním teplotám. Zkoumána byla jak polymer-cementová matrice, tak i alkalicky aktivované směsi, které svými vlastnostmi mnohdy převyšují vlastnosti běžně používaných silikátových kompozitů. Pozornost byla věnována pojivovým složkám na bázi cementu a zejména pak vedlejším produktům z technologické výroby, jakými jsou struska, škvára a popílky.

3. Metodika práce

Vzhledem ke svému rozsahu byla metodika práce rozdělena do několika etap. Každá etapa je detailněji popsána níže. Celkem se jedná o sedm etap:

První etapa byla rozdělena do dvou fází. V první fázi se zabývala výběrem vhodných primárních i alternativních surovin pro výrobu kompozitních materiálů. Výběr surovin byl zvolen s ohledem na dostupnost zdrojů všech uvedených surovin. Důraz byl kladen zejména na složky, které jsou schopny alkalické aktivace. Ve druhé fázi byly sestaveny receptury za použití vybraných odpadních surovin, které byly následně alkalicky aktivovány pomocí aktivátoru v podobě vodního skla (v případě potřeby změny silikátvého modulu byl využit hydroxid sodný). Sestaveny byly také receptury matic polymer-cementových malt s částečnou náhradou cementu. Zhotovena byla zkušební tělesa o rozměrech 20 x 20 x 100 mm. Závěrem první etapy bylo zhodnocení fyzikálně-mechanických vlastností vytvořených matic s případným zkoušením jejich teplotní odolnosti v pozorovací peci pro zjištění maximální zatěžovací teploty.

Druhá etapa úzce navazovala na etapu první a rovněž se zabývala vývojem matrice. Byly zde zvoleny receptury, které se v I. etapě jevily jako nejvhodnější pro další testování. Zohledněny byly výsledky testování v pozorovací peci a výsledky fyzikálně-mechanických vlastností vyrobených zkušebních těles v předešlé etapě. Opět byla zhotovena zkušební tělesa o rozměrech 20 x 20 x 100 mm. Závěrem první etapy bylo zhodnocení fyzikálně-mechanických vlastností se zkoušením odolnosti v pozorovací peci.

Ve **třetí etapě** byly optimalizovány receptury z předešlých dvou etap. Z alkalicky aktivovaných materiálů byla vybrána jedna receptura, která vykazovala nejlepší teplotní

odolnost na základě zkoušení v pozorovací peci. Pro porovnání bylo využito dvou rozdílných druhů kameniva. Zhotoveny byly také receptury polymer-cementových malt s částečnou náhradou cementu struskou z Oslavan. Zhotovena byla zkušební tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

Čtvrtá etapa se věnovala volbou vhodného teplotního zatížení. Sestavení teplotní křivky proběhlo na základě studia tuzemských i zahraničních platných technických norem.

Pátá etapa byla zaměřena na teplotní zatížení optimalizovaných receptur z předešlých etap. Zhotovená tělesa ze třetí etapy byla ve stáří 28 dní podrobena zatěžování teplotami do 1000 °C, u vybraných 1200 °C. Chlazení probíhalo pozvolna. Vzorky všech receptur byly po zatížení 1000 °C šokově chlazeny ponořením do vody. Zde probíhalo sledování změn po vystavení vysokým teplotám i rychlému chlazení, konkrétně se jednalo o vizuální posouzení tvorby trhlin, odprýskávání nebo odlupování vrstev matrice.

V **šesté etapě** byly na vzorcích referenčních i teplotně zatížených sledovány základní materiálové vlastnosti. Jednalo se především o fyzikálně-mechanické parametry, které zahrnovaly sledování změny rozměrů, objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu, pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Zkoumána byla také mikrostruktura, a to pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM). Podstatné bylo také analyzování fázových změn pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD).

Závěrečná **sedmá etapa** byla zaměřena na zhodnocení dosažených výsledků a jejich diskuzi.

4. Zkušební metody a postupy

Mezi zkušební metody fyzikálně-mechanických vlastností vyrobených malt byly zařazeny také mikrostrukturní analýzy. Popis jednotlivých metod a postupů je detailněji popsán níže.

4.1. Testování v pozorovací peci

Testování v pozorovací peci umožňuje vizuální posouzení hmoty, zejména pak počátek tvorby defektů, poruch nebo slinování a tavení. Jedná se o elektrickou pec, která je vybavena zdvihovým mechanismem pro umístění vzorku. Před pozorovacím otvorem byl umístěn fotoaparát propojený s počítačem. V průběhu zahřívání dochází k záznamu snímku v přesně definovaných teplotních (nebo časových) intervalech. Pozorování probíhalo zejména na vzorcích matric, jednalo se o vzorky tvaru krychle o velikosti hrany 20 mm. Nárůst teplot byl 35 °C/min, pozorování bylo ukončeno v případě, kdy byly na vzorcích pozorovány výrazné poruchy či tavení. Chlazení probíhalo pozvolna.

4.2. Stanovení zrnitosti kameniva

Podstatou zkoušky je roztřídění navážky kameniva a oddělení jednotlivých frakcí s využitím sady sít podle velikosti částic. Velikosti otvorů sít a počet sít jsou voleny podle druhu vzorku a požadované přesnosti. Zkouška probíhala v souladu s ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Číst 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. Hmotnost částic zachycených na sítích se uvádí v procentech k počáteční hmotnosti vzorku.

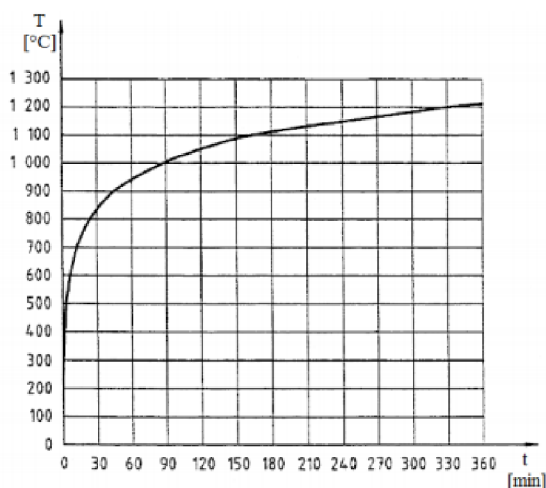
Zkušební navážka se vysuší při teplotě 110 ± 5 °C do ustálené hmotnosti, ponechá se vychladnout a zváží se – hmotnost M_1 . Ve druhém kroku se kamenivo pere – vzorek kameniva se vloží do nádoby, přidá se dostatečné množství vody a promíchá se – nutno uvolnit jemné částice. Na síto velikosti 0,063 mm se umístí ochranné síto a umístí se do odpadní nádoby. Vzorek se nalije na zkušební síta a promývá se vodou, dokud protékající voda sítím není čistší. Zbytek zachycený na sítích se vysuší do konstantní hmotnosti při teplotě 110 ± 5 °C, ponechá se vychladnout a zváží se – M_2 . Následně se sestaví sada sít vzestupně dle normové řady, kdy je nejmenší síto dole. Sloupec sít obsahuje dno i víko. Vypraný, vysušený a zvážený vzorek se vsype na sloupec sít, pak se ručně nebo mechanicky třese až do ustálené hmotnosti. Poté se odebírají jednotlivá síta a váží se zachycený materiál,

kdy se zaznamenává hmotnost R_1, R_2, R_i . Hmotnost materiálu na dně se označí jako P. Pokud se součet hmotností R_i+P liší od M_2 o více jak 1 %, musí se zkouška opakovat.

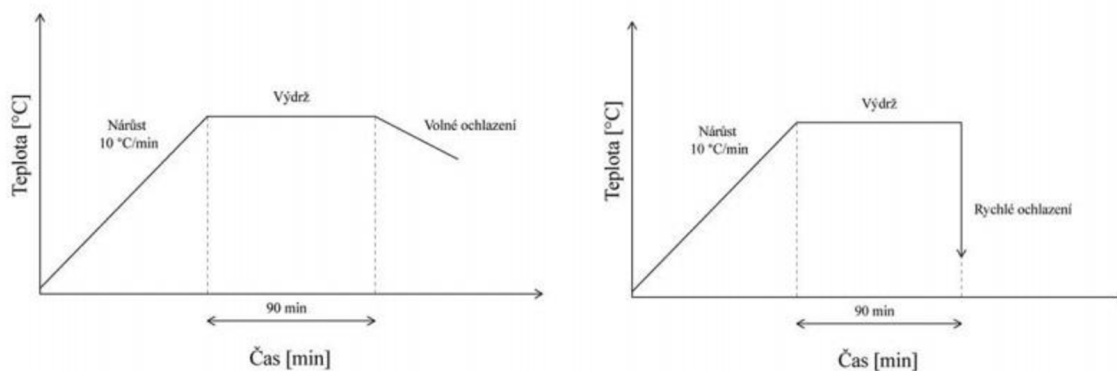
Vypočítá se zachycená hmotnost na každém síti jako procento k původní suché hmotnosti M_1 . Vypočítá se souhrnné procento propadů každým sítem z původní suché hmotnosti až k sítu 0,063 mm. Vypočítá se procento jemných částic f propadlých sítem 0,063.

4.3. Teplotní expozice v muflové peci

Zatěžování vysokými teplotami probíhalo v muflové peci podle pálicí křivky s cílem co nejvíce se přiblížit křivce normové (Obr. 15). Exponována byla tělesa tvaru kvádrů o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, přičemž zatěžovací teploty byly stanoveny na 600 °C, 1000 °C, vybrané receptury byly testovány také při 1200 °C. Nárůst teploty v průběhu zatěžování byl 10 °C/min, což je maximální výkon použité muflové pece. Izotermická výdrž na dané teplotě byla 90 minut, chlazení probíhalo pozvolně o rychlosti přibližně 1 °C/min. Na obr. 16 je znázorněn průběh teplotního zatěžování vzorků s pozvolných a šokovým ochlazením.



Obrázek 15: Normová teplotní křivka [37]



Obrázek 16: Teplotní zatěžování s pozvolným a šokovým chlazením

4.4. Šokové chlazení

Vybrané receptury byly podrobeny šokovému chlazení, které mělo simulovat hašení konstrukce při požáru. Vzorky byly exponovány při teplotě 1000 °C. Šokové chlazení bylo provedeno ihned po izotermické výdrž, kdy byly vzorky vyjmuty z pece a ihned ponořeny do nádoby s vodou o teplotě přibližně 18 °C. Ochlazování vzorků ve vodě trvalo zhruba 15 minut, než voda vychladla na přijatelnou teplotu. Poté byly vzorky z vody vytaženy, vysušeny a následně byly podrobeny zkoušení fyzikálně mechanických vlastností. U vybraných receptur byla také analyzována mikrostruktura a mineralogické složení pomocí SEM a XRD.

4.5. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty

Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty probíhalo podle ČSN EN 12190 - Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt. Objemová hmotnost ztvrdlého vzorku se stanoví z poměru jeho hmotnosti a objemu dle vztahu:

$$D = \frac{m}{V} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$$

Kde: m ...hmotnost tělesa [kg]

V ...objem tělesa $V=b\cdot h\cdot l$ [m³]

b ...šířka vzorku [mm]

h ...výška vzorku [mm]

l ...délka vzorku [mm]

Jednotlivé trámečky se zváží na laboratorních váhách s přesností na 0,01 g a změří se posuvným měřidlem s přesností na 0,01 mm. Z rozměrů se vypočte objem tělesa v zatvrdlém stavu. Výsledná objemová hmotnost je poměrem hmotnosti tělesa k jeho objemu, zaokrouhlí se na 10 kg/m³.

4.6. Stanovení pevností v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnost malty v tahu za ohybu se stanovuje tříbodovým zatěžováním až do porušení zkušebních trámeček ze ztvrdlé malty ve stáří 28 dní v souladu s ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. Pevnost malty v tlaku se zkouší na dvou částech trámečku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu podle ČSN EN 12190 - Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení pevnosti v tlaku správkových malt.

Pevnost v tahu za ohybu se vypočte ze vztahu:

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

Kde: F ...lomové zatížení vynaložené na střed trámečku [N]

l ...vzdálenost lomových podpěr [mm]

b ...šířka stěny trámečku [mm]

h ...výška boční stěny trámečku [mm]

Zkušební trámečky se vložily do přípravku, podélná osa vzorků je kolmá ke dvěma podpěrám vzdálených od sebe 100 mm. Zatížení působí přes zatěžovací válec na střed trámečku rovnoměrnou rychlostí $50 \pm 10 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$. Výsledná pevnost v tahu za ohybu se stanoví jako aritmetický průměr ze tří zkušebních vzorků z každé sady s přesností na 0,1 MPa.

Pevnost v tlaku se stanoví ze vztahu:

$$f_c = \frac{F_c}{A} \text{ [MPa]}$$

Kde: F_c ...největší zatížení při porušení vzorku [N]

A ...plocha pomocných destiček [mm^2]

4.7. Rastrovací elektronová mikroskopie

Zjišťování mikrostruktury probíhalo pomocí rastrovací elektronové mikroskopie, kdy byl využit elektronový mikroskop MIRA3 se Schottkyho autoemisní elektrodou. Tento přístroj je určen pro snímání vodivých i nevodivých preparátů ve vysokém rozlišení. Elektronový mikroskop je optický přístroj, ve kterém jsou elektrony vyraženy z orbitálu atomového obalu. Tyto excitované elektrony se nazývají sekundární elektrony. Vyražení může způsobit například jiný elektron o vyšší energii, rentgenové záření, radioaktivní záření apod. V elektronovém mikroskopu se používají elektromagnetické čočky. Jsou to v podstatě cívky, které vytváří vhodně tvarované magnetické pole. Jedním ze základních parametrů všech mikroskopů je jejich mezní rozlišovací schopnost. Protože mezní rozlišovací schopnost je úměrná vlnové délce použitého záření a elektrony mají podstatně kratší vlnovou délku (viz vlnové vlastnosti elektronu) než má viditelné světlo, má elektronový mikroskop

mnohem vyšší rozlišovací schopnost a může tak dosáhnout mnohem vyššího efektivního zvětšení (až 1 000 000×) než světelný mikroskop. [38]

Ověřování probíhalo na úlomcích ztvrdlých malt, jak referenčních, tak teplotě zatížených.

4.8. Rentgenová difrakční analýza

XRD (z ang. X-ray Diffraction) – rentgenová difrakční analýza se používá pro stanovení mineralogického (fázového) složení látek, které mají krystalický charakter. Vychází ze dvou principů, a to krystalografického uspořádání látek a z interakce rentgenového záření s částicemi tvořící krystalickou mřížku látek. Každý krystal obsahuje soubor rovnoběžných, v různých směrech proložených mřížkových krystalových rovin. Rovnoběžné roviny, které jsou od sebe stejně vzdáleny, jsou označovány jako stejnocenné roviny a jsou identifikovány Millerovými indexy (h, k, l). Tyto indexy udávají polohu rovin v prostorové mřížce. Mezirovinná vzdálenost těchto rovin se označuje malým písmenem „d“ a dle potřeby může být doplněna o Millerovými indexy „d, h, k, l“. Jestliže známe hodnoty mezirovinných vzdáleností různých minerálů a zjistíme-li hodnotu mezirovinné vzdálenosti zkoumané látky pomocí rentgenové difrakční analýzy, můžeme určit, z jakého minerálu je tvořena (resp. jaké minerály obsahuje). Při rentgenové difrakční analýze se používá charakteristické rentgenové záření, které obsahuje spektrální linie s přesně měřitelnými vlnovými délkami. Charakteristické záření je dáno materiálem antikatody. [39]

Vzorky pro RTG analýzu byly po vysušení do konstantní hmotnosti rozdrceny, namlety a prošly sítím 0,063 mm. Takto připravené byly vloženy do prstence a vloženy do difraktometru.

5. Vstupní suroviny

5.1. Pojivová složka

5.1.1. Cement

Pro přípravu polymer-cementových malt byl jako hlavní složka zvolen cement. Obecně je cement hydraulická maltovina se schopností tuhnutí pod vodou. V této diplomové práci byl použit Portlandský cement CEM I 42,5 R, výrobcem je Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý. Výrobce garantuje průměrnou pevnost v tlaku po 28 dnech 57-62 MPa a obsah portlandského slínku 95-100 %. Tento cement se vyznačuje rychlým nárůstem pevnosti a vysokým vývinem hydratačního tepla. Výrobce rovněž garantuje stálost fyzikálních a chemických vlastností. V této práci je cement částečně nahrazen elektrárenskou struskou z Oslavan, viz níže.

5.1.2. Vysokopecní struska

Vysokopecní struska se používá i jako částečná náhrada portlandského cementu v silikátových kompozitech. Do směsi se přidává pro zlepšení určitých vlastností materiálu jak v čerstvém, tak ztvrdlém stavu. Vlastnosti a výroba strusky jsou detailněji popsány v kapitole 2.2.1. této práce.

Pro účely této diplomové práce byla použita velmi jemně mletá vysokopecní struska Štramberk, výrobce Kotouč Štramberk, spol. s.r.o. Výrobce udává jemnost mletí až 3629 cm²/g. Chemické složení strusky je uvedeno v tabulce níže.

| Složka | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | S | K ₂ O |
|--------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------------------|-----|------------------|
| % hm. | 39,9 | 6,7 | 39,7 | 0,3 | - | 1,3 | 0,4 |

Tabulka 5: Chemické složení vysokopecní strusky Štramberk

5.1.3. Struska Oslavany

Škvára vzniká jako odpad spalování pevných paliv v roštových topeništích. Její upotřebitelnost závisí na druhu spalovaného paliva, ze kterého vznikla. U čerstvé škváry jsou nebezpečné nespálené zbytky, které se dosud nerozložily, jejich množství je proto limitováno maximálním obsahem 10 %.

S ohledem na svůj původ a možný nevyužitý potenciál byla jako pojivová složka zvolena struska ze závodu Prefa Oslavany, která byla použita jako částečná náhrada portlandského cementu v polymer-cementových správkových maltách, ověřena byla také možnost její alkalické aktivace. Jednalo se o hrubozrnný materiál černého zabarvení se skleným leskem. V první řadě byla struska z Oslavan namleta na požadovanou jemnost. Mletí probíhalo v kulovém mlýně při rychlosti 500 ot/min. Stanovení měrného povrchu podle Blaina prokázalo jemnost namletí 530 m²/kg. Velmi jemně namletý materiál měl zaručit větší reaktivitu strusky s alkalickým aktivátorem. Testována byla také teplotní odolnost této strusky v pozorovací peci, která prokázala stabilitu do cca 1200 °C, kdy se zrna strusky začala nadouvat. Při teplotě 1350 °C se začala zrna tavit, viz obr. 16. Na obr. 17 jsou zrna strusky z Oslavan po teplotní expozici v pozorovací peci. Největší pozorovanou změnou byla změna barvy a nárůst objemu vlivem tavení.



Obrázek 17: Zrna strusky s Oslavan v pozorovací peci



Obrázek 18: Zrna strusky z Oslavan po teplotní expozici v pozorovací peci

Struska z Oslavan byla také podrobena chemickému rozboru – cca 80 % skelné fáze, cca 50 % SiO₂, 22 % Al₂O₃ a 8,6 % FeO.

5.1.4. Popílek

Elektrárenský popílek vzniká jako vedlejší produkt při spalování uhlí při teplotách 1400-1600 °C. Vlastnosti, výroba a rozdělení popílků je detailněji popsáno v kapitole 2.2.2. této práce. Popílek se do směsí přidává pro zlepšení zpracovatelnosti, dokáže zajistit zvýšenou odolnost vůči kyselinám, mrazu, alkalicko-křemičité reakci a také zvyšuje odolnost v případě zatěžování vysokými teplotami. V mikrostruktuře vyplňují zrna popílku větší póry. Přínosem je také fakt, že popílek je schopen zabránit vymývání alkalických složek materiálu, což vede ke stálému vzhledu výrobků.

V tuzemsku jsou k dispozici dva druhy popílků, a to z černého uhlí a z hnědého uhlí. Hnědouhelné popílky jsou méně kvalitní. Pro účely této práce byl vybrán černouhelný popílek z elektrárny Dětmárovice (EDĚ). Použitý popílek je produktem klasického vysokoteplotního spalování. Popílek je po spalování zachycován v elektrostatických odlučovačích. Chemické složení popílku z elektrárny Dětmárovice je uvedeno v tabulce níže.

| Složka | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|------------------|-------------------|------------------|
| % hm. | 54,2 | 24,2 | 6,4 | 0,3 | 4,0 | 2,8 | 2,8 | 0,3 | 1,0 |

Tabulka 6: Průměrné chemické složení popílku Dětmárovice

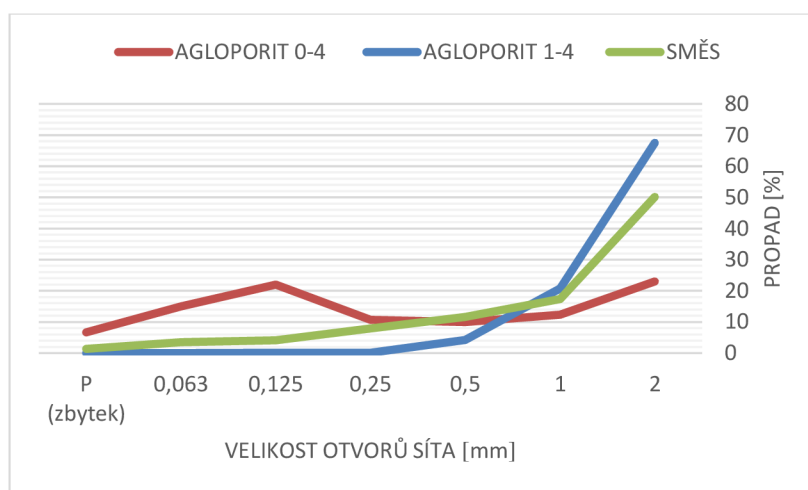
5.2. Plnivo

S ohledem na předchozí zjištění byla vybrána dvě různá kameniva – popílkový agloporit jako zástupce pórovitého kameniva a amfibolit jako zástupce hutného kameniva.

Popílkový agloporit byl zvolen vzhledem k jeho nízkému obsahu SiO₂ v krystalické fázi. Nízký obsah SiO₂ (pouze kolem 7 %) předurčuje toto kamenivo jako plnivo správkových hmot s odolností vůči vysokým teplotám. Dalším důvodem použití právě agloporitu jsou nízké objemové změny při zahřívání, což také souvisí s výše zmíněným nízkým obsahem SiO₂. Popílkový agloporit patří do skupiny umělých pórovitých kameniv.

Vyrábí se slinováním krátkodobým výpalem na aglomeračních roštech při teplotách 1100–1250 °C. Za výhodu u tohoto kameniva se považuje nízká pořizovací cena, nízká hmotnost, objemová stálost a vysoká spotřeba druhotné suroviny pro výrobu.

Pro účely diplomové práce byl použit popílkový agloporit dvou frakcí, a to 0-4 mm a 1-4 mm, vyráběný sbalkováním létavých popílků z černého uhlí. Použitý agloporit byl složen z cca 39,3 % mullitu, 39 % amorfni fáze a cca 7 % SiO₂. V první řadě byly stanoveny základní parametry kameniva, jako jsou nasákavost, objemová hmotnost a sypná hmotnost. Na základě síťového rozboru byla ze dvou druhů kameniva sestavena jedna směs tak, aby se svou zrnitostí co nejvíce blížila ideální křivce zrnitosti. Mísením kameniv byla snaha dosáhnout minimální mezerovitosti a vyšší hutnosti malt.



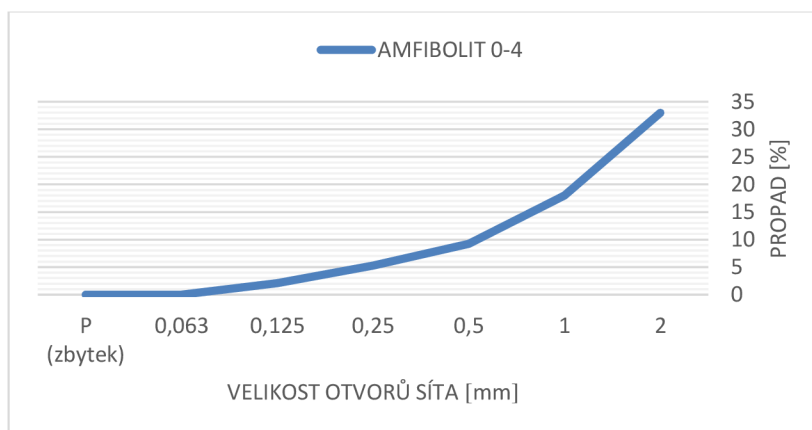
Graf 2: Síťový rozbor agloporitu

Následně byly stanoveny základní fyzikální parametry smíšeného kameniva:

- Nasákavost v čase 5 min: $NV = 15 \%$
- Sypná hmotnost volně sypaného kameniva $\rho_b = 910 \text{ kg/m}^3$
- Objemová hmotnost kameniva $\rho_v = 2000 \text{ kg/m}^3$

Amfibolit (dodavatel KÁMEN Zbraslav, a.s. Želešice) byl zvolen s ohledem na předchozí zjištění. Jedná se o černošedou až černozelelou metamorfovanou horninu, která je těžce rozpojitelná. Vyznačuje se vysokou pevností v tlaku, nízkou nasákavostí a dobrou odolností vůči vysokým teplotám. Výhodou je také nízká nasákavost. Stejně jako v případě

agloporitu byla nejdříve stanovena křivka zrnitosti a základní fyzikální vlastnosti použité frakce 0-4 mm.



Graf 3: Sítový rozbor amfibolitu

Základní fyzikální parametry použitého amfibolitu:

- Nasákavost $NV = 0,4 \%$
- Sypná hmotnost volně sypaného kameniva $\rho_b = 1490 \text{ kg/m}^3$
- Objemová hmotnost kameniva $\rho_v = 2900 \text{ kg/m}^3$

5.3. Polymerní přísada

Polymerní přísady mají příznivý vliv na zpracovatelnost a přilnavost malty k podkladu. Vybranou polymerní přísadou pro účely zhotovení polymer-cementových malt v této práci byl modifikátor Vinnapas 5043 N, dodaný společností RADKA spol. s.r.o. Jedná se o kopolymer vinylacetátu a etylenu ve formě bílého disperzního prášku, dodávaného v 25 kg papírovém pytli. Dávkování Vinnapasu do sanačních malt je doporučeno v rozmezí 3-5 % z hmotnosti cementu.

5.4. Rozptýlená výztuž

S ohledem na dosažené výsledky v [40] byla jako rozptýlená výztuž vybrána polypropylenová (PP) vlákna, která mají příznivý vliv během působení vysokých teplot. Základní stavební jednotkou PP vláken je polypropylen, tedy C_3H_6 . Vlákna vznikají

polymerizací propylenu, za vzniku termoplastického polymer propylenu. Řetězec polypropylenových jednotek se dá ovlivnit uspořádáním molekul. Pevnost v tahu PP se pohybuje v rozmezí 22–32 MPa, teplota tavení se pohybuje kolem 160–170 °C, bod měknutí je v rozmezí 140–150 °C. Polypropylen má vcelku nízkou hustotu, která se pohybuje okolo 900 kg/m³. PP vlákna odolávají chemikáliím a díky jejich nepolární struktuře jsou stabilní i v zásaditém prostředí silikátových kompozitů. Jsou málo navlhavé. Dávkování polypropylenových vláken se obvykle pohybuje v rozmezí od 0,8 do 1,1 kg/m³ kompozitu. Každé PP vlákno má přesně specifikované vlastnosti a od tohoto je odvozena i jeho účinnost ve výsledném kompozitu. Vlákna po kvalitním rozmísení vytvoří v betonové směsi třídimenzionální strukturu. Vlákna se vyrábí v délce 5–15 mm a průměru 10–20 μm. 1 kg PP vláken představuje zhruba 300 milionů jednotlivých vláken, což znamená, že při nízkém dávkování je kompozit vyztužený velkým počtem vláken. Z hlediska zvyšování pevností vyztuženého kompozitu nemají PP vlákna na výsledné vlastnosti vliv. [40]

PP vlákna se do kompozitů, zejména betonu, přidávají hlavně kvůli zamezení vzniku trhlin, které vznikají v raných fázích tuhnutí a tvrdnutí celého kompozitního systému. Případně vzniklou trhlinou by do struktury cementového kompozitu mohla prosakovat voda nebo chemikálie a snížit tak jeho mrazuvzdornost a schopnost cementového kompozitu odolávat agresivnímu prostředí. Při vystavení kompozitního systému vysokým teplotám dochází k rozkladu PP vláken, který vyhořívají a ve struktuře vytvářejí síť kapilárních pórů. Pokud jsou vlákna dobře ukotvena, zamezí také explozivnímu odprýskávání povrchových vrstev.

Pro účely této práce byla použita PP vlákna Fibrin 315. Vlákna byla užita jak v polymer-cementových maltách, tak v alkalicky aktivovaných materiálech. Jako optimální dávka bylo zvoleno množství 1 kg/m³ směsi.

5.5. Vodní sklo a NaOH

Vodní sklo lze charakterizovat jako roztok nebo prášek křemičitanu sodného či draselného. Vlastnosti, výroba a druhy vodního skla jsou detailněji popsány v kapitole 2.3.1. této práce. Vlastnosti a výroba hydroxidu sodného jsou detailněji popsány v kapitole 2.3.2. této práce.

Pro účely zhotovení alkalicky aktivovaných směsí bylo použito tekuté vodní sklo sodné od firmy Vodní sklo a.s., se silikátovým modulem 1,6. Tento modul byl upravován vhodným množstvím NaOH. Vodní sklo podle výrobce obsahuje 44 % sušiny. [25]

NaOH bylo použito ve formě peciček od firmy Penta s.r.o. Pro lepší rozpustnost ve vodním skle byly pecičky nadrceny na menší úlomky v hmoždíři a poté byly vsypány do kádinky s vodním sklem, kde byly do celkového rozpuštění intenzivně míchány. Rozpuštění bylo doprovázeno vývinem tepla.

5.6. Voda

Voda přidávaná do směsí byla voda z vodovodního řádu a splňovala požadavky 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.

6. Postup přípravy zkušebních těles

Pro experimenty byly zvoleny dvě kategorie receptur jako správkových malt pro konstrukce zasažené požárem. Jednalo se o polymer-cementovou maltu s částečnou náhradou cementu struskou z Oslavan, a o alkalicky aktivované materiály.

Polymer-cementové malty s částečnou náhradou cementu struskou z Oslavan byly připravovány za použití agloporitu jako plniva. Z alkalicky aktivovaných hmot byly navrženy hmoty za použití agloporitu i amfibolitu.

6.1. Výroba zkušebních těles

Vážení předem upravených surovin probíhalo na laboratorní váze Radwag PS 2100/C/2 s přesností vážení 0,01 g. Míchání receptur etapy I. a II., tedy samotných matic probíhalo ručně. Nejdříve byly dávkovány sypké směsi, následně byla dávkována voda a v případě AAM také vodní sklo. Úprava silikátového modulu vodního skla byla provedena pomocí rozdrcených peciček NaOH. Směs vodního skla a NaOH byla míchána až do úplného rozpuštění. Nejhorší zpracovatelnost měly popílkové směsi, kdy bylo při míchání směsi pozorováno vyměšování vody, tzv. bleeding. Pro I. a II. etapu byly využity ocelové formy o rozměrech 20 x 20 x 100 mm. Zhutňování těles probíhalo na vibračním stole. Poté byly naplněné formy ponechány na vzduchu a po dvou dnech odformovány. Zrání těles probíhalo v laboratorních podmínkách po dobu 28 dní.

Výroba zkušebních těles pro etapu III probíhala obdobně jako výroba těles z I. a II. etapy. Vážení probíhalo stejným způsobem jako v předchozím případě. Míchání probíhalo pomocí laboratorního míchadla s metlou ve větší nádobě, kde byly suroviny dávkovány následovně: nejdříve byly dávkovány sypké složky, ke kterým se přidala odvážená rozptýlená výztuž (PP vlákna odvážena na analytických vahách). V případě polymer-cementových směsí byl přidán také polymerní modifikátor (Vinnapas). Všechny složky byly řádně promíchány. Pórovité kamenivo agloporit bylo před mícháním směsí nasáknuto vodou tak, že se ke kamenivu 5 min před míchání přidalo určité množství vody tak, aby bylo dosaženo 5minutové nasákavosti. Poté byly sypké složky vsypány do nádoby s kamenivem a směs byla pomocí míchadla promíchávána po dobu cca 2 minut. Poslední dávkovanou složkou bylo vodní sklo. Do směsí s agloporitem již nebyla dále přidávána voda, neboť

nasyčené kamenivo po čase míchání začalo vodu uvolňovat. Vodní součinitel byl stanoven z poměru množství vody v kamenivu a množství vody ve vodním skle k celkovému množství sušiny (sytké složky, sušina obsažená ve vodním skle). Následně byly směsi naplněny formy o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, zhutňování probíhalo na vibračním stolku. Proces míchání, naplňování forem a hutnění netrval déle než 15 minut. Odformování probíhalo po 2 dnech, zrání v laboratorních podmínkách po dobu 28 dní.



Obrázek 19: Ocelová forma 40 x 40 x 160 mm pro výrobu těles z etapy III

6.2. Návrh teplotních expozičních podmínek

Teplotní zatěžování probíhalo na vzorcích trámečků po 28 dnech zrání v laboratorních podmínkách. Vybranými zatěžovacími teplotami byly 600, 1000 a u vybraných receptur také 1200 °C, s ohledem na dosažené výsledky teplotní odolnosti matric z I. a II. etapy v pozorovací peci. Zatěžování bylo prováděno v pecích ESP-10 s regulátorem Ht40A. Na nastavovacím panelu lze jednoduše nastavit náběh teplot, izotermickou výdrž na dané teplotě, pozvolné chlazení nastává po výdrži vypnutím pece. Nárůst teploty v průběhu zatěžování byl 10 °C/min, izotermická výdrž na dané teplotě 90 minut, poté došlo k vypnutí pece a pozvolnému chlazení těles, cca 1 °C/min. Vyhodnocení testovaných parametrů je uvedeno v kapitole 7.3. pro každou recepturu.

Všechny připravené receptury byly podrobeny šokovému chlazení, které mělo simulovat hašení konstrukce při požáru. Vzorky byly exponovány při teplotě 1000 °C. Šokové chlazení bylo provedeno ihned po izotermické výdrži, kdy byly vzorky vyjmuty z pece a ihned ponořeny do nádoby s vodou o teplotě přibližně 18 °C. Ochlazování vzorků

ve vodě trvalo zhruba 15 minut, než voda vychladla na přijatelnou teplotu. Poté byly vzorky z vody vytaženy, vysušeny a následně byly podrobeny zkoušení fyzikálně mechanických vlastností. U vybraných receptur byla také analyzována mikrostruktura pomocí SEM a XRD. Na obrázcích níže jsou ukázky průběhu rychlého chlazení ve vodě.



Obrázek 20: Vzorek v peci při teplotě 1000 °C



Obrázek 21: Rozžhavený zkušební trámeček vytažený z pece při teplotě 1000 °C

7. Vyhodnocení experimentů

V této kapitole jsou uvedeny poznatky z jednotlivých etap. Jsou zde sepsány závěry z výstupů z pozorovací pece, shrnuty rozměrové změny a případný vznik trhlin nebo deformací při teplotním zatěžování. Hodnoceny byly také objemové hmotnosti a pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. U vybraných receptur byla zkoumána také mikrostruktura pomocí rastrovací elektronové mikroskopie, mineralogické složení jednotlivých receptur bylo stanovováno pomocí difrakční rentgenové analýzy.

7.1. Etapa vývoje matrice I

- Výběr materiálů a sestavení receptur

Pro etapu I byly vybrány dobře dostupné odpadní suroviny, které splňovaly předpoklad alkalické aktivace. Výběr byl založen na zjištěných poznacích z předchozích výzkumů a ze zjištěných poznatků z teoretické části. Nejprve byly vytvořeny receptury porovnávající vliv silikátového modulu a množství alkalického aktivátoru na výsledné mechanické parametry, jakými jsou pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Vodní součinitel receptur za použití strusky z Oslavan byl konstantní, a to $w=0,2$. V případě receptur s popílkem z Dětmovic byl vodní součinitel z důvodů lepší zpracovatelnosti zvýšen z hodnoty 0,2 na 0,3. Stejně tak tomu bylo v případě receptury, kde byla použita vysokopeční struska Štramberk, vodní součinitel byl s ohledem na zpracovatelnost zvolen na hodnotu 0,35. S přihlédnutím ke skutečnosti, že nejdostupnějším aktivátorem je vodní sklo, bylo jako aktivátor v této i následujících etapách použito sodné vodní sklo. Nejlépe se jevící receptury pak byly zatěžovány rostoucí teplotou v pozorovací peci. Tabulka 7 níže znázorňuje vybrané receptury pro etapu I a jejich specifikaci.

Kromě AAM byly připraveny také receptury s částečnou náhradou cementu struskou z Oslavan. Dodržen byl stejný vodní součinitel jako u AAM, tedy 0,2. Náhrada cementu byla v množství 25, 30 a 35 % z hmotnosti cementu. Pro zachování stejné hodnoty vodního součinitele nebylo možné vytvořit další směsi s vyšší náhradou cementu, a to z důvodu horší zpracovatelnosti celé směsi. Specifikace těchto receptur je rovněž uvedena v tabulce 7 níže.

Tabulka 7: Vybrané receptury, etapa I

| OZN. | Specifikace | M _s |
|---------|--------------------------------------|----------------|
| ASS | Struska Štramberk, 25 % VS | 1,6 |
| APD | Popílek Dětmárovice, 25 % VS | 1,1 |
| ASO 1,6 | Struska Oslavany, 25 % VS | 1,6 |
| ASO 1,3 | Struska Oslavany, 40 % VS | 1,3 |
| ASO 1,1 | Struska Oslavany, 40 % VS | 1,1 |
| ASO 0,9 | Struska Oslavany, 40 % VS | 0,9 |
| CSO25 | CEM I 42,5 R + 25 % Struska Oslavany | - |
| CSO30 | CEM I 42,5 R + 30 % Struska Oslavany | - |
| CSO35 | CEM I 42,5 R + 35 % Struska Oslavany | - |

- Vizuální posouzení zhotovených vzorků

Kromě základních fyzikálně-mechanických parametrů byl posuzován také vizuální vzhled zhotovených vzorků.

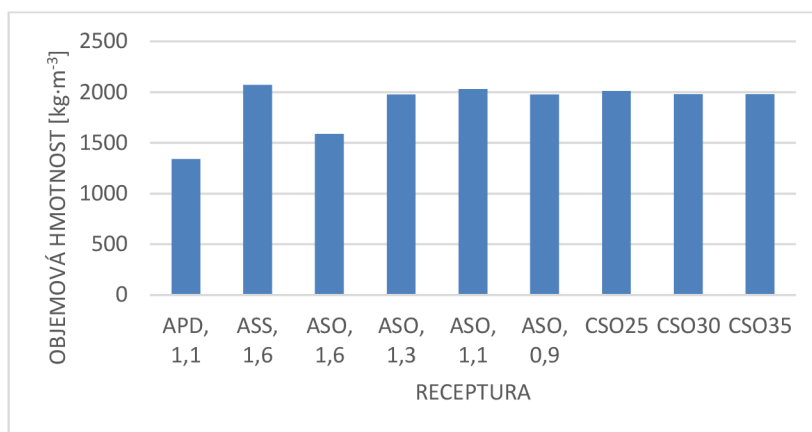
U vzorků receptury ASS byly zaznamenány největší deformace způsobené smršťováním. Patrná byla také změna barvy vzorků, kdy v průběhu zrání při laboratorních podmínkách přecházela barva z bílé do zelené, avšak konečný vzorek byl bílý až šedý. Žádné objemové změny nebyly zaznamenány u vzorků receptury APD, nebyla také patrná změna barvy. Vzorky receptur za použití strusky z Oslavan byly vždy černé, vlivem zrání se jejich barva neměnila. U vzorků s nejnižším silikátovým modulem ($M_s=0,9$) byl zaznamenán vznik povrchových trhlin, zatímco u vzorků s nejvyšším silikátovým modulem a zároveň nejnižším obsahem vodního skla jako aktivátoru ($M_s=1,6$; 25 % VS) bylo pozorováno drobení v hranách a rozích připravených vzorků. Vzorky připravené aktivací popílku měly po celou dobu zrání konstantní chování, nebyl zaznamenán vznik trhlin, avšak ihned po odformování byly vzorky velmi křehké. Nutno také dodat, že zrání ve formě trvalo mnohdy i několik dní. Vzorky s částečnou náhradou cementu nevykazovaly žádné objemové změny ani povrchové trhliny, až na recepturu CSO30, kdy byla pozorována nepatrná síť trhlin na horních plochách zkoušených vzorků.

Tvorba nepatrných výkvětů byla zaznamenána u vzorků receptury APD, které se vyskytovaly po stranách zkušebních trámečků. Největší tvorba výkvětů byla pozorována u vzorků alkalicky aktivované strusky z Oslavan s nejnižším silikátovým modulem. U dalších receptur nebyly výkvěty pozorovány. Tento fakt značí dobrou kompatibilitu pojivové složky

a alkalického aktivátoru v podobě vodního skla. Vzorky s částečnou náhradou cementu nevykazovaly tvorbu výkvětů a jejich chování během zrání bylo stabilní.

- Objemová hmotnost

Prvním zkoušeným fyzikálně-mechanickým parametrem byla objemová hmotnost vzorků ve ztvrdlém stavu po 28 dnech zrání. Na hodnotách objemových hmotností se projevíly typické vlastnosti pojivových složek a hodnoty vodního součinitele. Vodní součinitel určoval také zpracovatelnosti směsi. Pro přehlednost jsou hodnoty objemových hmotností uvedeny v grafu 4 níže.

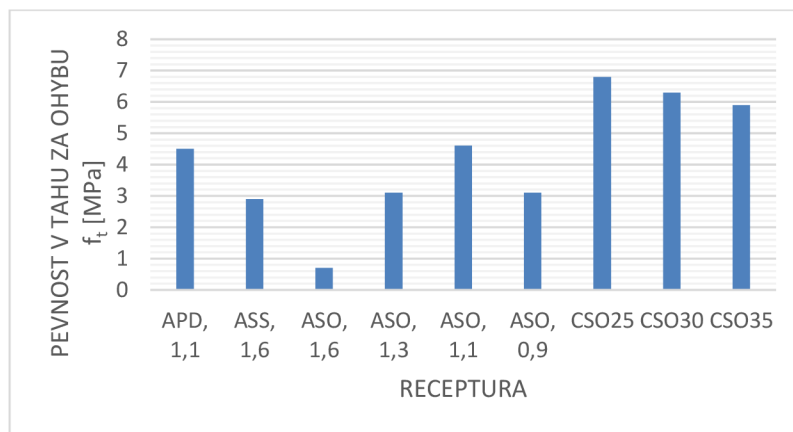


Graf 4: Objemové hmotnosti, etapa I

Nejvyšší zaznamenanou objemovou hmotnost ve ztvrdlém stavu vykazovaly vzorky receptury ASS, a to 2070 kg·m⁻³, naopak nejnižší objemovou hmotnost měly vzorky alkalicky aktivovaného popílku Dětmárovice, a to 1340 kg·m⁻³. Objemová hmotnost vzorků alkalicky aktivované strusky z Oslavan byla logicky srovnatelná. Stejně tak tomu bylo v případě vzorků s částečnou náhradou cementu struskou z Oslavan, v jejichž případě se hodnoty objemových hmotností pohybovaly kolem 2000 kg·m⁻³.

- Pevnosti

Ověřovány byly také pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech o rozměrech 20 x 20 x 100 mm. V grafu 5 jsou znázorněny pevnosti v tahu za ohybu zkoušených receptur a v grafu 6 jsou uvedeny tlakové pevnosti. Zkoušení pevnosti proběhlo opět ve stáří 28 dní.



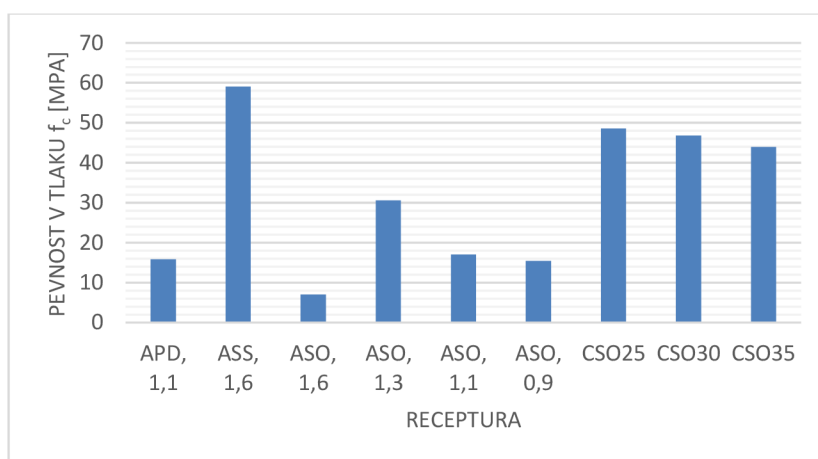
Graf 5: Pevnosti v tahu za ohybu, etapa I

Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu u AAM bylo dosaženo u vzorku receptury ASO s $M_s=1,1$, a to 4,6 MPa, naopak nejnižší ohybové pevnosti byly zaznamenány u vzorku receptury ASO s $M_s=1,6$; a to 0,7 MPa. Hodnota ohybových pevností alkalicky aktivované strusky z Oslavan se silikátovým modulem 1,3 a 0,9 byla stejná, a to 3,1 MPa. Zhotovené matrice pro budoucí polymer-cementovou maltu vykazovaly nejvyšší ohybové pevnosti, avšak s různým obsahem strusky z Oslavan se jejich hodnota příliš nelišila. Pevnost v tahu za ohybu se u těchto vzorků receptury CSO25 byla nejvyšší, a to 6,8 MPa, nejnižší ohybová pevnost v tlaku byla zaznamenána u receptury CSO35, a to 5,9 MPa.

Tlakové pevnosti nevykazovaly stejný trend jako pevnosti v tahu za ohybu. Nejvyšší pevnosti v tlaku dosáhly vzorky receptury ASS, a to až 59,1 MPa, čímž se potvrdila skutečnost, že vysokopecní struska Štramberk je schopna alkalické aktivace za použití vodního skla jako aktivátoru, a to bez úpravy silikátového modulu. Nejnižší pevnosti v tlaku vykazovaly vzorky alkalicky aktivované strusky z Oslavan se silikátovým modulem 1,6, zde bylo použito nejméně vodního skla jako alkalického aktivátoru. Možný důvod byl ten, že obsah vodního skla nebyl pro alkalickou aktivaci dostačující, proto byly ověřeny také směsi s vyšším obsahem vodního skla jako aktivátoru. Ukázalo se, že vyšší obsah alkalického

aktivátoru má pozitivní vliv na pevnosti v tlaku, se zvyšujícím se obsahem aktivátoru vzrostly také pevnosti v tlaku. Vzorky se silikátovým modulem 1,3 vykazovaly pevnosti v tlaku 30,6 MPa, což je nárůst až o 400 %. Vzorky se silikátovým modulem 0,9 a 1,1 vykazovaly pevnosti v tlaku nižší, a to 15,4 MPa, resp. 17,0 MPa. I přesto byl nárůst pevností v tlaku za použití vyššího obsahu alkalického aktivátoru a nižšího silikátového modulu víc než dvojnásobný. Pevnost v tlaku vzorků, kde byl cement částečně nahrazován struskou z Oslavan, klesal se zvyšující se dávkou strusky. Pevnosti v tlaku vzorků s náhradou cementu struskou z Oslavan byly nejvyšší v případě nejnížší náhrady (25 %), a to 48,6 MPa. Nejnižší pak byly hodnoty pevností v tlaku u vzorků s 35% náhradou, a to 43,9 MPa.

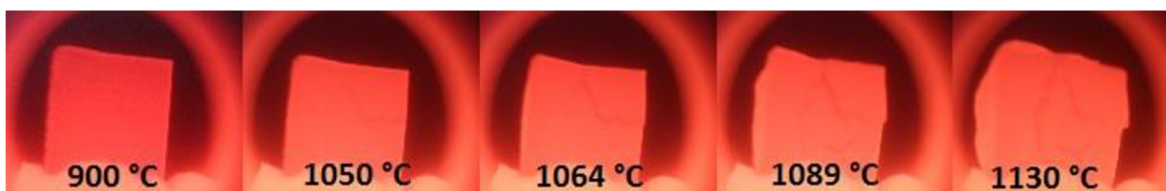
Lomové plochy vykazovaly hutnou strukturu s malým obsahem pórů.



Graf 6: Pevnosti v tlaku, etapa I

- Pozorovací pec

Zatěžování receptury APD probíhalo v pozorovací peci do teploty 1130 °C. Vzorek nevykazoval žádné výrazné defekty či trhliny do teploty cca 1050 °C, poté byl zaznamenán vznik trhliny v horním rohu vzorku. Od teplot vyšších než 1064 °C se trhlina zvětšovala. Po dosažení teploty cca 1089 °C se začal zkoušený vzorek nadýmát, pozorováno bylo také rozšíření a vznik nových trhlín. Překročením zmiňovaných 1089 °C byl pozorován vznik dalších trhlín, deformace se zvětšovala zejména nadýmáním vzorku. Obrázek 22 ukazuje chování vzorku matrice se zvyšující se teplotou. Po ukončení testu v pozorovací peci byl vzorek pozvolna chlazen.



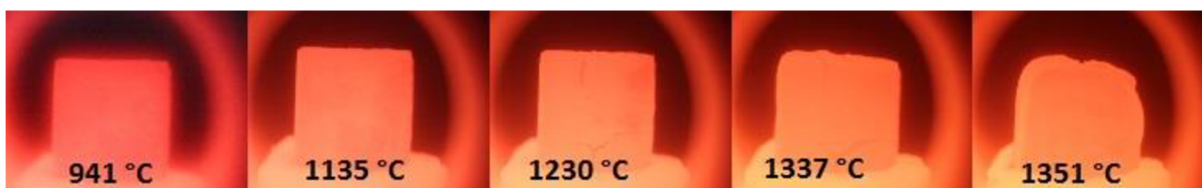
Obrázek 22: Snímky z pozorovací pece, receptura APD, etapa I

Na obrázku 23 lze vidět rozdíl před a po teplotní expozici. Struktura vzorku matrice PD byla pórovitého charakteru, avšak po teplotním zatížení byl vzorek lesklý a expandovaný. Změna barvy není příliš patrná.



Obrázek 23: Receptura APG, etapa I. Vlevo vzorek před teplotní expozicí, vpravo vzorek po teplotní expozici

Nejstabilnější chování do teploty cca 1200 °C vykazoval vzorek matrice receptury ASS. Tento vzorek byl vystaven maximální teplotě 1351 °C. Po překročení teploty 1230 °C byla zaznamenána trhlinka ve spodní části, která se zvyšováním teploty zvětšovala. I přes vznik trhliny byl vzorek vcelku stabilní až do teploty 1337 °C, kdy se pomalu začínal tavit. Testování bylo ukončeno dosažením teploty 1351 °C, kdy byl zaznamenán vznik nové trhliny, která se rozrůstala napříč zkoušeným vzorkem, pozorováno bylo také smrštění vlivem tavení struktury.



Obrázek 24: Snímky z pozorovací pece, receptura ASS, etapa I

Na obrázku 25 vlevo je viditelný úlomek vzorku receptury ASS před testováním v pozorovací peci. Nejsou patrné povrchové trhliny. Snímek pořízený po vychladnutí vzorku (vpravo) také poukazuje na trhlinu napříč vzorkem, patrná je také změna barvy. Vzorek zatížený vysokou teplotou byl na povrchu lesklý.



Obrázek 25: Vzorek receptury ASS. Vlevo před teplotní expozicí, vpravo po teplotní expozici

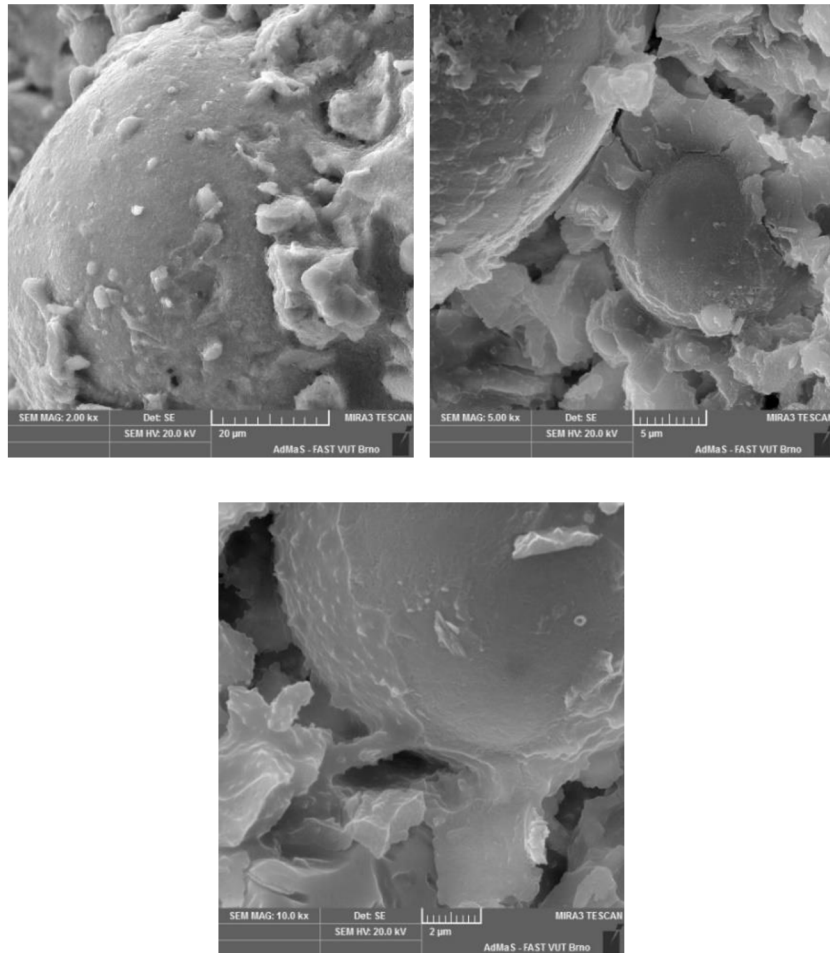
Při testování receptury ASO se silikátovým modulem 1,3 byl zaznamenán vznik trhlin při nízké teplotě, konkrétně při 600 °C, jak ukazuje obrázek 26. Dosažením teploty 640 °C se trhliny zvětšovaly, vzorek však stále držel tvar krychle. Při teplotě 900 °C byly trhliny velikostně přibližně stejné jako při teplotě 600 °C. K částečné expanzi vnitřní struktury začalo docházet při teplotě cca 950 °C, kdy byla na snímku z pozorovací pece patrná jakási bublina, která se se zvyšující se teplotou zvětšovala. Při teplotě 1003 °C byla zaznamenána expanze z obou stran zkoušeného vzorku. Zkoušení bylo pozastaveno dosažením teploty 1026 °C, kdy bylo rozhodnuto, že se dále vzorek nebude testovat na vyšší teplotu. Při této teplotě byly patrné velké trhliny vzniklé tlakem ve struktuře, povrch vzorku se začal tavit.



Obrázek 26: Snímky z pozorovací pece, receptura ASO, etapa I

- Rastrovací elektronová mikroskopie

Pomocí rastrovací elektronové mikroskopie byla zkoumána mikrostruktura vzorku receptury APD. Zřetelně viditelná byla zrna popílku, která jsou obvykle hladká. V případě alkalické aktivace byla zrna popílku zreagovaná, na jejich povrchu se nacházely hydratační produkty. Na snímcích (obr. 27) byla také nalezena zrna, která byla z části začleněná do matrice. Tento fakt značí, že proces alkalické aktivace může být prohlášen za úspěšný.



Obrázek 27: SEM snímky zreagovaných zrn popílku receptury APD. Nahoře vlevo zvětšení 2000x, vpravo 5000x. Dole zvětšení 10000x

- Shrnutí a diskuze výsledků I. etapy vývoje matrice

V první etapě byly testovány receptury matric na bázi vysokopecní strusky, popílku z Dětmovic a strusky z Oslavan. Zhotoveny byly také matrice pro polymer-cementový kompozit s částečnou náhradou cementu struskou z Oslavan. Posuzovány byly vizuální změny barev a deformací, základní fyzikálně-mechanické parametry jakými jsou objemová

hmotnost ve ztvrdlém stavu, pevnost v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Dále byla posuzována teplotní odolnost v pozorovací peci.

Největší deformace během zrání byly zaznamenány u vzorků receptury ASS, ale i přesto tyto vzorky vykazovaly největší pevnosti v tlaku a nejlepší teplotní odolnost. Dobrá teplotní odolnost, avšak tvorba trhlin během teplotního zatěžování, byly pozorovány u receptury APD.

Pro porovnání vlastností byly zhotoveny 4 receptury alkalicky aktivované strusky z Oslavan, které se lišily především v silikátovém modulu aktivátoru. Různý byl také obsah alkalického aktivátoru, tedy vodního skla. Silikátový modul vodního skla byl vždy upraven patřičným množstvím NaOH. Nejdříve byla vyzkoušena receptura s 25 % vodního skla se silikátovým modulem 1,6. Vzorky z této receptury byly spíše drolivé, s mírnými výkvěty. Ohybové i tlakové pevnosti byly velmi nízké, což mohlo být způsobeno nedostatečným množstvím aktivátoru. Z toho důvodu byly pro porovnání zhotoveny další receptury s vyšším obsahem vodného skla a různým silikátovým modulem. Obsah vodního skla byl zvolen 40 % z hmotnosti pojiva. Výsledky zkoušek pevností prokázaly pozitivní vliv vyššího obsahu alkalického aktivátoru, kdy pevnost vzorků byla až trojnásobná. Pozorován byl také nižší výskyt výkvětů.

Zhotovené matrice s částečnou náhradou cementu struskou z Oslavan nevykazovaly žádné objemové změny, ani výskyt povrchových trhlin či výkvětů. Matrice byla kompaktního charakteru, s nízkým obsahem viditelných pórů na lomových plochách.

Na základě zjištěných poznatků byly vybrány receptury, které se jeví jako nejvhodnější pro další zkoumání v následující etapě. Vybrány byly tedy alkalicky aktivovaná struska z Oslavan a alkalicky aktivovaná vysokopecní struska. Alkalicky aktivovaný popílek nebyl vybrán pro další posuzování, neboť jeho chování při vystavení vysokým teplotám nebylo tak stabilní, jako v případě ostatních receptur. V následující etapě byly vyrobeny směsi, které tyto AAM kombinovaly. Byla to snaha dosáhnout dobré teplotní odolnosti, menší tvorby výkvětů, stabilnějšího chování při zatěžování zvyšující se teplotou a srovnatelných pevnostních charakteristik. Bylo také rozhodnuto, že navržené matrice s částečnou náhradou cementu nebude potřeba upravovat, a to na základě jejich dobrého chování během zrání.

7.2. Etapa vývoje matrice II

- Výběr receptur

V rámci této etapy byly sestaveny receptury na základě zjištěných poznatků z etapy předchozí. Vybrány byly kombinace vysokopecní strusky a strusky z Oslavan. Kombinací těchto surovin mělo být docíleno dobré teplotní odolnosti včetně eliminace vzniku trhlin uvnitř struktury při teplotním zatěžování, nižší výkvětovitosti a dobrých fyzikálně-mechanických parametrů. Zohledňován byl také silikátový modul alkalického aktivátoru. Vodní součinitel byl u všech receptur zachován stejný, a to $w=0,2$. Tabulka s vybranými recepturami a jejich specifikací je znázorněna níže.

Tabulka 8: Vybrané receptury, etapa II

| OZN. | Specifikace | M _s |
|-------------|--|----------------|
| ASO30VS 1,1 | 70 % Struska Oslavany, 30 % Struska Štramberk, 30 % VS | 1,1 |
| ASO25VS 1,1 | 70 % Struska Oslavany, 30 % Struska Štramberk, 25 % VS | 1,1 |
| ASO25VS 1,6 | 70 % Struska Oslavany, 30 % Struska Štramberk, 25 % VS | 1,6 |
| ASO25VS 1,4 | 70 % Struska Oslavany, 30 % Struska Štramberk, 25 % VS | 1,4 |

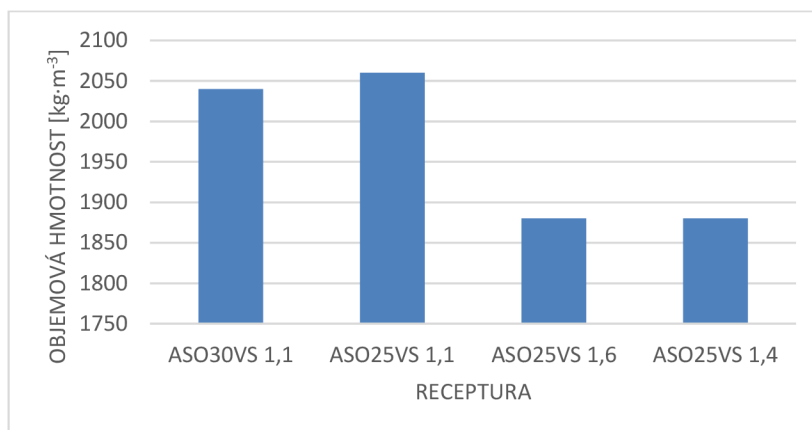
- Vizuální posouzení zhotovených vzorků

Vzorky připravené aktivací vysokopecní strusky a strusky z Oslavan vykazovaly při zrání velmi podobné chování. Nejznamenější deformace vlivem smršťování byly zaznamenány u receptury s nejvyšším obsahem vodního skla a silikátovým modulem 1,1, kdy došlo k destrukci zkušebních těles již při odformování těles, nebo při zrání. U ostatních receptur s použitím strusky z Oslavan a vysokopecní strusky nebyly deformace ani trhliny na povrchu vzorků pozorovány. Změna barvy nebyla u žádných vzorků připravených v etapě II pozorována.

Mírné výkvěty byly zaznamenány pouze u receptury, která kombinovala strusku z Oslavan a vysokopecní strusku, s nejnižším silikátovým modulem, tedy u receptury ASO30VS 1,1. U ostatních vzorků nebyla přítomnost výkvětů zaznamenána.

- Objemová hmotnost

V grafu 7 níže jsou uvedeny objemové hmotnosti připravených receptur.

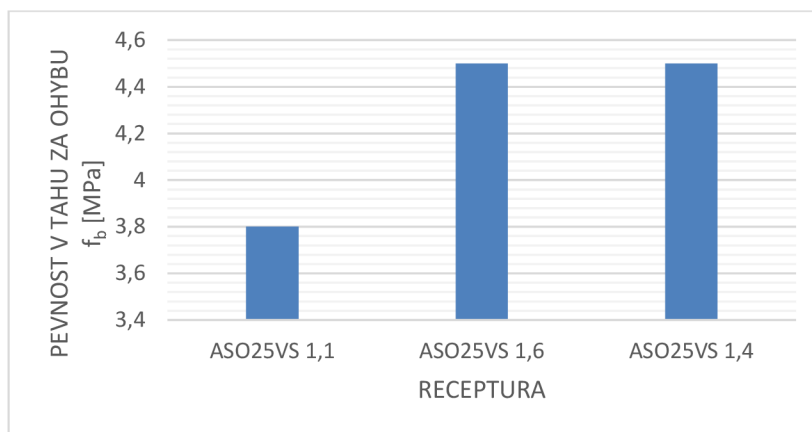


Graf 7: Objemové hmotnosti, etapa II

Nejvyšší objemové hmotnosti dosahovaly vzorky receptury ASO25VS se silikátovým modulem aktivátoru 1,1, a to $2060 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hodnoty objemových hmotností při silikátových modulech aktivátoru 1,6 a 1,4 byly stejné, a to $1880 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost vzorků receptury s nejvyšším obsahem vodního skla, tedy receptury ASO30VS 1,1, dosahovala hodnoty $2040 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. S ohledem na předchozí etapu nevykazovaly objemové hmotnosti v této etapě žádné značné výkyvy.

- Pevnosti

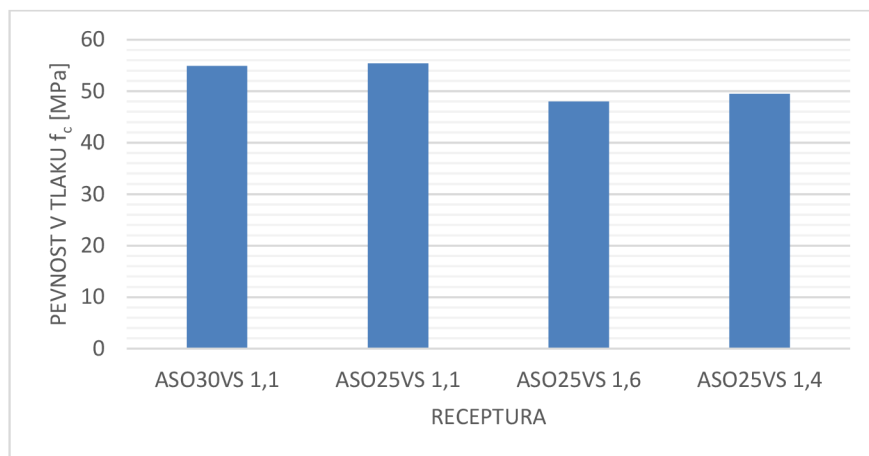
Pevnosti byly stanovovány na tělesech o rozměrech 20 x 20 x 100 mm ve stáří 28 dní. Srovnání pevností v tahu za ohybu všech receptur etapy II je znázorněno v grafu 8, v následujícím grafu 9 je uvedeno srovnání pevností v tlaku.



Graf 8: Pevnosti v tahu za ohybu, etapa II

Z grafu 8 výše lze vypočítat chybějící údaj pevnosti v tahu za ohybu u vzorků receptury ASO30VS, s nejvyšším obsahem vodního skla a silikátovým modulem 1,1. Vzorky při odformování podlely destrukci, proto tento údaj chybí, stanovovány byly pouze pevnosti v tlaku. Nejnižší pevnost v tahu za ohybu vykazovala receptura ASO25VS 1,1, která dosáhla hodnoty 3,8 MPa. Vyšší a zároveň stejné pevnosti v tahu za ohybu vykazovaly vzorky z receptur se silikátovým modulem 1,6 a 1,4, a to 4,5 MPa. Oproti etapě I byly pevnosti v tahu za ohybu vyšší. Lze tak konstatovat příznivý vliv alkalické aktivace materiálu, který kombinoval strusku z Oslavan se struskou vysokopecní.

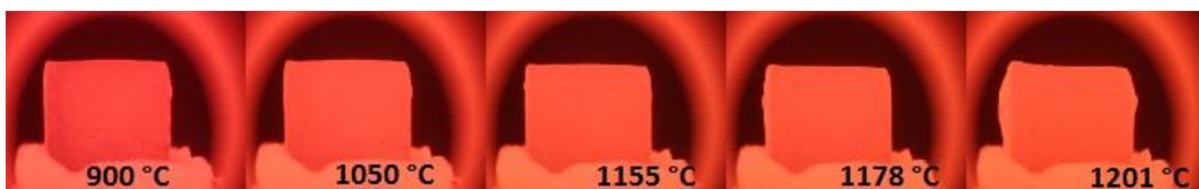
Vyšších pevností v tlaku oproti předchozí etapě dosahovala všechna zkušební tělesa z připravených receptur, které kombinovaly různá pojiva. Vůbec nejvyšší pevností v tlaku se vyznačovaly vzorky kombinace strusky z Oslavan a vysokopecní strusky se silikátovým modulem 1,1; a to 55,4 MPa. Obdobné pevnosti v tlaku vykazovaly vzorky stejného poměru strusek, se stejným silikátovým modulem ale vyšším obsahem vodního skla, a to 54,9 MPa. Pevnost v tlaku vzorků se silikátovým modulem 1,6 byla nižší, a to 48 MPa a pevnost v tlaku vzorků se silikátovým modulem 1,4 byla 49,5 MPa. Lze tedy tvrdit, že kombinace strusky z Oslavan a vysokopecní strusky ze Štramberku má pozitivní vliv na fyzikálně-mechanické parametry a je schopna alkalické aktivace.



Graf 9: Pevnosti v tlaku, etapa II

- Pozorovací pec

Testování receptury ASO30VS se silikátovým modulem 1,1 probíhalo do maximální teploty 1200 °C. Vlivem rostoucí teploty byl vzorek stabilní do teploty cca 1155 °C, nebyl pozorován vznik povrchových trhlin ani změna objemu vlivem smrštění nebo rozpínání. Dosažením teploty 1178 °C došlo u zkoumaného vzorku k mírnému zvětšování objemu. Při dalším zvyšování teploty již nastávala expanze vzorku, způsobená vnitřním tavením. Při testování této receptury však nebyl zaznamenán vznik trhlin, viz. obrázek 28. Lze tak tvrdit, že kombinace vysokopecní strusky a strusky z Oslavan v tomto poměru vykazovala dobrou teplotní odolnost a stabilitu. Obrázek 29 pak ukazuje strukturu vzorku této receptury po vychladnutí.

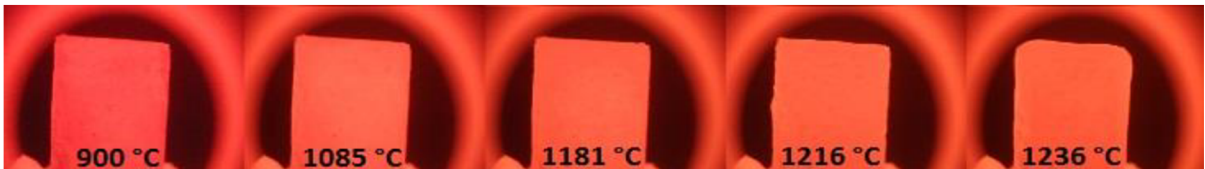


Obrázek 28: Snímky z pozorovací pece, receptura ASO30VS 1,1, etapa II



Obrázek 29: Vzorek receptury ASO30VS 1,1 po teplotní expozici v pozorovací peci, etapa II

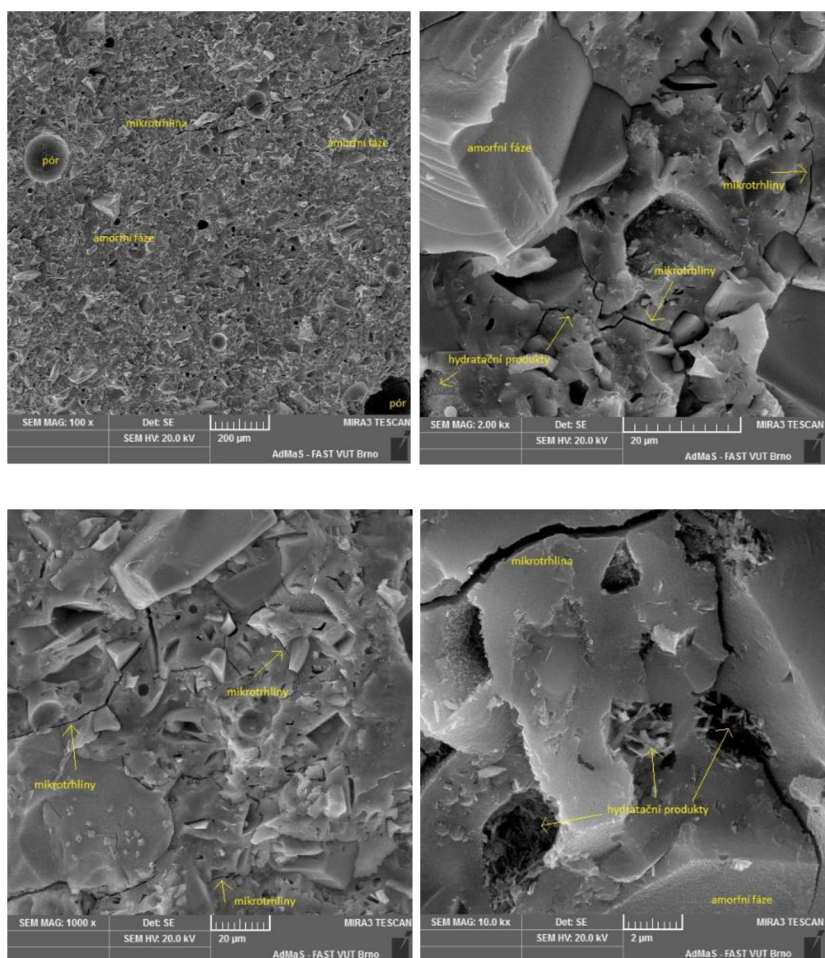
Ještě lepší teplotní odolnost a stabilní chování se zvyšující se teplotou vykazoval vzorek receptury ASO25VS se silikátovým modulem 1,6. Na obrázku 30 níže lze vidět chování vzorku při zatěžování teplotou až do 1236 °C. Do teploty 1181 °C byl vzorek stabilní, nevykazoval žádné objemové smrštění, odlupování povrchových vrstev nebo vznik trhlin. Při teplotě cca 1190 °C byla zaznamenána mírná změna objemu, doprovázená vznikem bublinek ve struktuře. Při maximální teplotě, které byl vzorek vystaven, a to 1236 °C, začalo docházet k tavení, zejména na horním povrchu zkoušené krychle. Lze ale konstatovat, že zatížení teplotou až 1200 °C odolal.



Obrázek 30: Snímky z pozorovací pece, receptura ASO25VS 1,6, etapa II

- Rastrovací elektronová mikroskopie

Vybrané receptury byly také podrobeny zkoumání pomocí rastrovací elektronové mikroskopie. U vzorků receptury ASO25VS 1,6 byly viditelné mikrotrhliny a póry. Struktura však byla kompaktní. V některých dutinách byl pozorován vznik hydratačních produktů, jednalo se o jehličky ettringitu, viz obr. 31. Některé ostrohranné útvary mohou být i nezreagovaná zrna strusky.



Obrázek 31: SEM snímky matrice ASO25VS 1,6. Nahoře vlevo zvětšení 100x, vpravo 2000x, dole vlevo zvětšení 10000x, vpravo 1000x

- Shrnutí a diskuze výsledků II. etapy vývoje matrice

V etapě II byla pozornost zaměřena na vytvoření alkalicky aktivované matrice kombinací dvou různých druhů strusky v určitém poměru, s různým silikátovým modulem. Testovány byly varianty se 70 % strusky z Oslavan a 30 % vysokopecní strusky, se

silikátovým modulem 1,1, 1,4 a 1,6, a s obsahem vodního skla jako aktivátoru v poměru 25 a 30 % z hmotnosti pojivové složky.

Testována byla receptura s použitím 70 % strusky z Oslavan, 30 % vysokopecní strusky ze Štramberku a 30 % vodního skla, se silikátovým modulem 1,1. Zkušební tělesa podlely výrazným změnám, došlo k rozlomení vzorků již při odformování nebo při zrání, proto nebyly ověřeny pevnosti v tahu za ohybu. Tyto vzorky také vykazovaly největší výskyt výkvětů a povrchových trhlin. I přes tyto okolnosti byly stanoveny pevnosti v tlaku, které přesahovaly hodnotu 54 MPa po 28 dnech zrání. S ohledem na tato zjištění byly připraveny další receptury se stejným poměrem strusek, ale s nižším obsahem vodního skla (25 %) jako aktivátoru a s různým silikátovým modulem (1,1; 1,4 a 1,6). Nižší silikátový modul než 1,1 nebyl testován, jelikož vzorky s nižším silikátovým modulem byly velmi náchylné k tvorbě trhlin a výkvětů, jak ukázala etapa I.

Velmi dobré odolnosti vůči působení vysoké teploty dosáhly vzorky receptury ASO25VS 1,1, které byly podrobeny zkoumáním v pozorovací peci. Vzorek v pozorovací peci byl stabilní do teploty cca 1155 °C, poté mírně expandoval vlivem vnitřního tlaku, nicméně se dá konstatovat, že odolal i teplotě 1200 °C, kdy nebyly patrné další větší objemové změny či tvorba trhlin. Byl tedy prokázán pozitivní vliv snížení obsahu vodního skla v recepturách kombinujících strusku z Oslavan a vysokopecní strusku ze Štramberku. Bylo také využito mikrostrukturní analýzy pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu, která poukázala na mikrotrhliny a mikropóry ve struktuře, avšak byly nalezeny také hydratační produkty usazené v dutinách. Mikrostruktura se jevila jako hutná, s vysokým obsahem amorfni fáze.

Srovnatelných hodnot pevností v tlaku vykazovaly vzorky kombinace strusek se silikátovými moduly 1,4 a 1,6; stejné byly rovněž pevnosti v tahu za ohybu a objemové hmotnosti. Vzorky těchto receptur nevykazovaly výrazné objemové změny a vznik výkvětů.

Ještě lepší teplotní odolnosti v pozorovací peci dosáhly také vzorky receptury ASO25VS 1,6. Odolaly teplotě až 1236 °C, objemové změny během teplotního zatěžování nebyly příliš patrné, až na vznik bublinek vlivem vnitřního tavení na horní ploše zkoušeného vzorku. Kombinací těchto složek se také zvýšily pevnosti v tlaku, které dosahovaly průměrných hodnot 48 MPa. U těchto vzorků byla zaznamenána mírná síť trhlin na povrchu, ale tvorba výkvětů zaznamenána nebyla.

7.3. Etapa vývoje kompozitního materiálu

- Výběr materiálů, sestavení receptur a sestavení podmínek teplotní expozice

Na základě poznatků z předešlých dvou etap byly v této etapě navrženy receptury kompozitního systému s použitím dvou druhů kameniva, a to popílkového agloporitu a amfibolitu. Vybrány byly tři receptury polymer-cementového kompozitu s částečnou náhradou cementu struskou z Oslavan, v množství 25, 30 a 35 %. Z alkalicky aktivovaných materiálů byla vybrána receptura, která se v předešlé etapě jevila jako nejlepší z hlediska fyzikálně-mechanických parametrů. Vybrána byla receptura s použitím 70 % strusky z Oslavan, 30 % vysokopecní strusky a 25 % vodního skla. Silikátový modul byl ponechán beze změn, a to $M_s=1,6$.

Agloporit byl vždy nechán nasáknout vodou podle jeho nasákavosti, z toho důvodu již ke směsím nebyla potřeba přidávat další voda, a to především v případě alkalicky aktivovaných hmot, jelikož zvolené vodní sklo obsahovalo 56 % vody. V případě polymer-cementových malt byl vodní součinitel upraven na hodnotu $w=0,35$. Zhotovené polymer-cementové malty s použitím amfibolitu měly vodní součinitel stejný.

Tabulka se specifikací receptur z této etapy je uvedena níže.

Tabulka 9: Vybrané receptury – kompozit, etapa III

| OZN. | Specifikace |
|----------|--|
| CSO25 | CEM I 42,5 R + 25 % Struska Oslavany, agloporit |
| CSO30 | CEM I 42,5 R + 30 % Struska Oslavany, agloporit |
| CSO35 | CEM I 42,5 R + 35 % Struska Oslavany, agloporit |
| ASO – AG | 70 % Struska Oslavany, 30 % Struska Štramberská, 25 % VS, agloporit, M_s 1,6 |
| ASO – AM | 70 % Struska Oslavany, 30 % Struska Štramberská, 25 % VS, amfibolit, M_s 1,6 |

V této etapě byla vytvořena tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, která byla exponována při teplotách 22 (laboratorní uložení; referenční vzorky), 600, 1000 a vybrané receptury také 1200 °C. Pro šokové chlazení vodou byla zhotovena tělesa stejných rozměrů. Při teplotě 1000 °C byla z pece vyjmuta a ihned ponořena do vody.

- Vizuální posouzení vzorků

U připravených polymer-cementových malt nebyly během zrání zaznamenány žádné výrazné objemové změny ani vznik trhlin či výkvětů. Mírné výkvěty byly pozorovány u AAM, zejména pak u vzorků s amfibolitem. Trhliny na povrchu nebyly u AAM zaznamenány, spíše byly zaznamenány malé dutinky. Změny barev byly samozřejmě patrné po teplotní expozici, a to při všech zvolených expozičních teplotách i při různém způsobu chlazení vzorků.

Obrázek 32 znázorňuje strukturu vzorku receptury CSO30, který byl podroben rychlému zchlazení. Trhliny nebyly patrné, ale byla zaznamenána přítomnost malých dutinek a pórů, a to na všech plochách zkoušených vzorků. Svrchní vrstva trámečku ale byla kompaktního charakteru, nebylo pozorováno žádné odlupování povrchové vrstvy vzorku. Obdobná struktura povrchu rychle zchlazovaných trámečků byla pozorována u všech receptur využívajících agloporit jako plnivo.



Obrázek 32: Povrch rychle ochlazovaného vzorku receptury CSO30

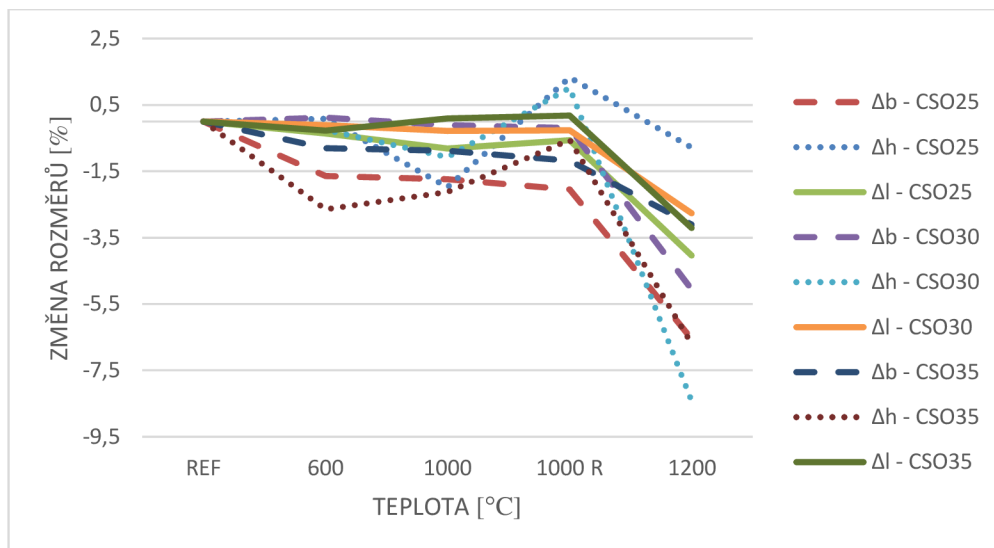
Na povrchu rychle chlazeného vzorku alkalicky aktivovaných strusek s amfibolitem nebyly patrné trhliny, byly viditelné pouze dutiny, jak je vidět na obrázku 33 níže. Tyto dutinky byly pozorovány již před teplotní expozicí. Struktura působila hutně, bez známek odlupování povrchu. Pozorováno bylo pouze mírné drolení hran vzorku.



Obrázek 33: Povrch rychle ochlazovaného vzorku receptury ASO – AM

- Rozměrové změny

Změny rozměrů byly zaznamenávány na zkušebních tělesech ve tvaru hranolu o rozměrech 40 x 40 x 160 mm a jsou vyjádřeny pro každý rozměr, tj. délku, šířku a výšku, v procentech. V grafu 10 níže jsou znázorněny rozměrové změny polymer-cementových malt.

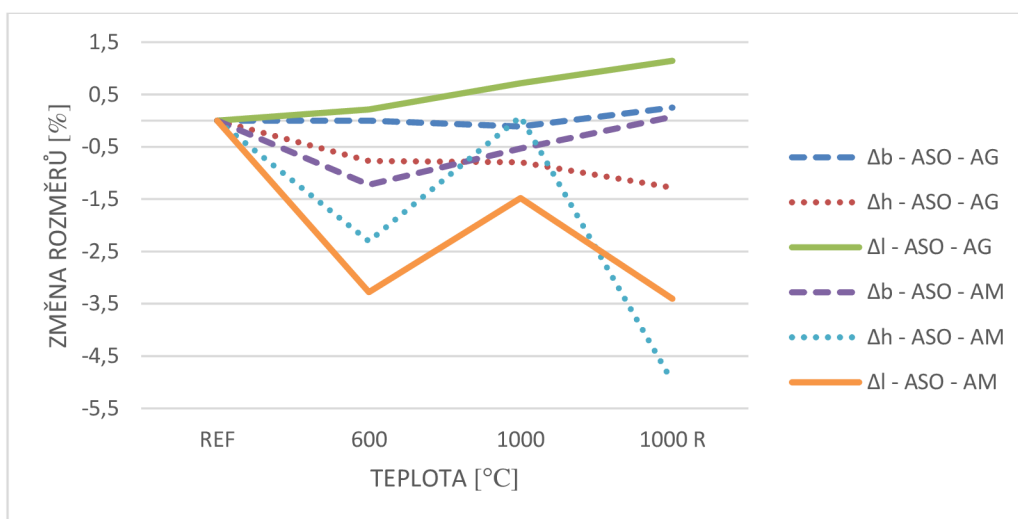


Graf 10: Rozměrové změny polymer-cementových malt

Největší rozměrové změny, konkrétně smrštění, bylo zaznamenáno při teplotě 1200 °C, a to u všech rozměrů, což bylo způsobeno spékáním kompozitního systému. K nejmenším změnám rozměrů docházelo v případě šířky a výšky vzorků, kdy se tyto změny pohybovaly v rozmezí 0-2 %. Obecně se dá tvrdit, že změny rozměrů byly plynulého charakteru. Vzhledem ke způsobu chlazení po teplotním zatížení 1000 °C byly menší

rozměrové změny zaznamenány u vzorků, které byly rychle ochlazovány ve vodě než při pozvolném chlazení v prostoru pece.

V grafu 11 níže jsou porovnány rozměrové změny alkalicky aktivovaných materiálů s různým druhem plniva. Z grafu je patrné, že k největším změnám rozměrů docházelo u šířky vzorku s amfibolitem, a to až -3,2 %, při zatěžovací teplotě 600 °C. Obecně lze tvrdit, že vzorky s použitím agloporitu byly rozměrově stálejší.



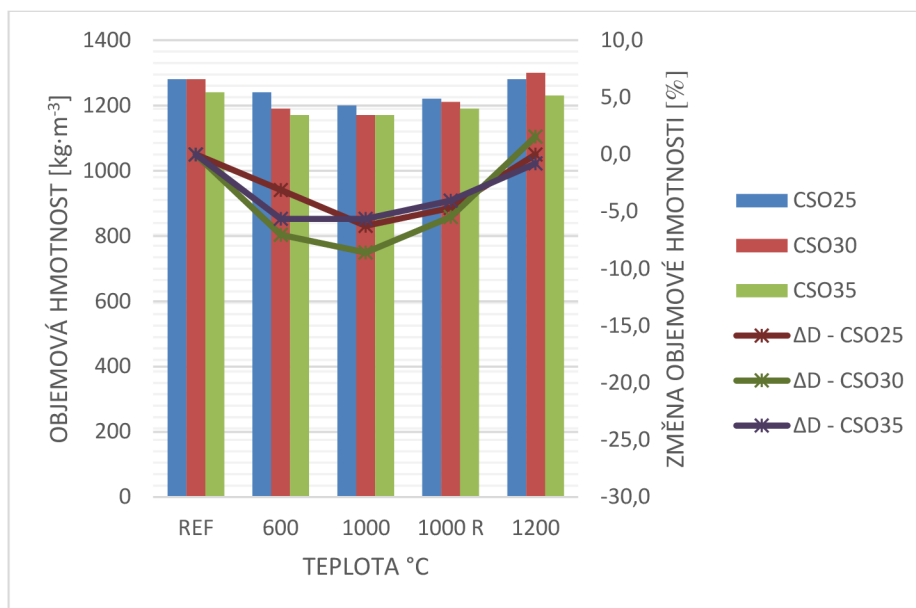
Graf 11: Změny rozměrů AAM

- Objemová hmotnost

Hodnota objemové hmotnosti je úzce spjata s použitým plnivem, a to jak v čerstvém, tak i ztvrdlém stavu. Malty obsahující kamenivo amfibolit vykazovaly vyšší objemové hmotnosti než malty obsahující agloporit. Porovnání objemových hmotností a jejich změn všech receptur v závislosti na expoziční teplotě je znázorněno v grafu 12 níže.

Srovnatelných hodnot objemových hmotností dosahovaly referenční vzorky receptur CSO25 a CSO30, $1280 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, nižší objemové hmotnosti, a to $1240 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ dosáhly vzorky receptury CSO35. Se zvyšující se zatěžovací teplotou měly objemové hmotnosti klesající trend, největší pokles byl zaznamenán při teplotě 1000 °C u vzorků receptury CSO30, a to -8,6 %. Rychle chlazené vzorky vykazovaly mírné zvýšení hodnot objemových hmotností oproti vzorkům pozvolna chlazeným. Výraznější hmotností úbytek pomalu ochlazovaných těles může být způsobený faktem, že při pomalém ochlazování dochází po izotermické výdrži na dané teplotě k dalšímu rozkladu matrice. Rychlým zchlazením vodou

je tento proces zastaven, proto mohou být hmotnostní úbytky menší. Další nárůst objemových hmotnosti byl zaznamenán při teplotě 1200 °C, kdy došlo k tavení struktury a vzniku keramických vazeb. Přesto ale byla tělesa pórovitého charakteru. Nárůst OH při teplotě 1200 °C byl nejzřetelnější u polymer-cementové malty receptury CSO30, a to o 7,1 %.

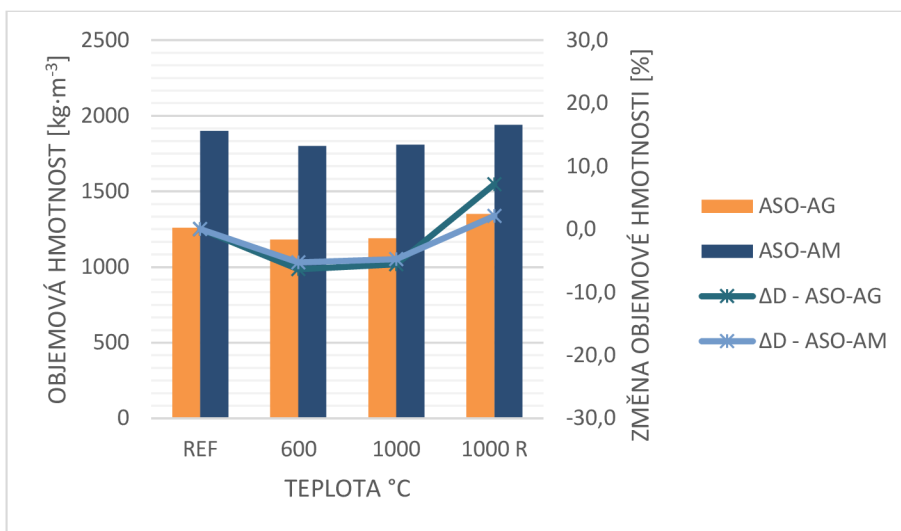


Graf 12: Objemové hmotnosti polymer-cementových malt

V grafickém znázornění níže (graf 13) jsou porovnány objemové hmotnosti zhotovených alkalicky aktivovaných směsí. Z výstupu jsou patrné vyšší hodnoty OH u vzorků obsahujících amfibolit. Objemová hmotnost referenčních těles vykazovala hodnotu 1900 kg·m⁻³. Nejvyšší pokles OH nastal při teplotě 600 °C, kdy byly hodnoty objemových hmotností u vzorků s amfibolitem o 5,3 % nižší oproti referenční hodnotě. Při této teplotě bylo dosaženo OH 1800 kg·m⁻³. Mírný nárůst objemové hmotnosti byl pak zaznamenán při teplotě 1000 °C. Nárůst OH o 2,1 % oproti referenčním vzorkům byl zaznamenán u rychle ochlazovaných vzorků, kdy bylo dosaženo hodnoty 1940 kg·m⁻³.

Stejný trend změn objemových hmotností byl zaznamenán u receptur s použitím popílkového agloporitu jako plniva. OH referenčních těles dosahovala hodnot 1260 kg·m⁻³. Největší změna objemové hmotnosti byla zaznamenána při teplotě 600 °C, kdy OH klesla o 6,3 % oproti referenčním hodnotám. Objemová hmotnost vzorků při této teplotě

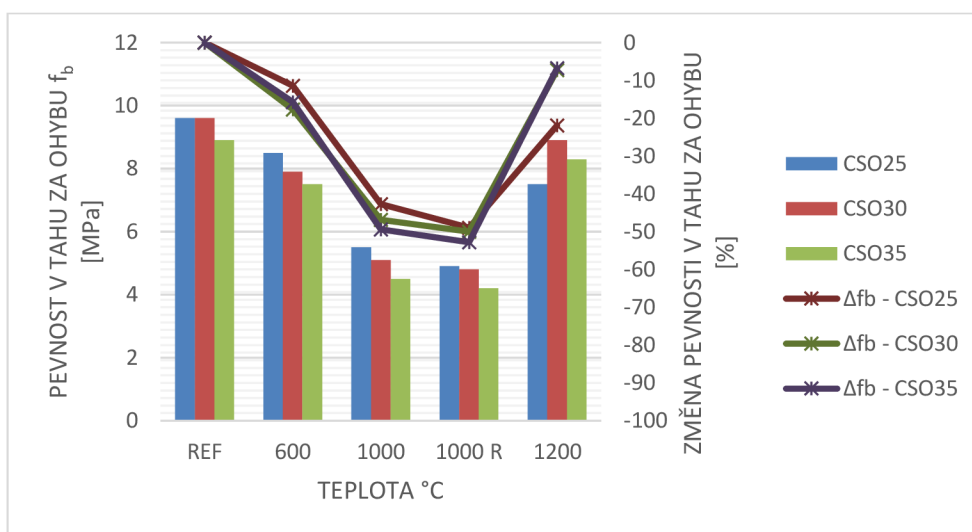
dosahovala hodnot $1180 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. K poklesu OH oproti referenční hodnotě o 5,6 % došlo při teplotě $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Stejně jako v případě použití amfibolitu jako plniva, byl zaznamenán nárůst OH u rychle ochlazovaného vzorku, a to o 7,1 %. Hodnota objemové hmotnosti byla v tomto případě nejvyšší, a to $1940 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.



Graf 13: Objemové hmotnosti alkalicky aktivovaných malt

- Pevnost v tahu za ohybu

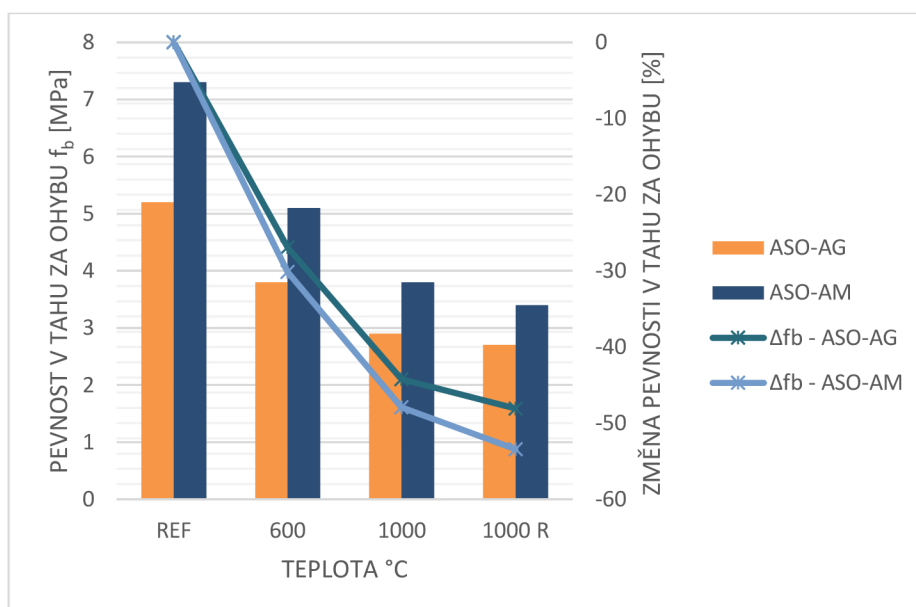
Hodnoty ohybových pevností a jejich změn polymer-cementových malt jsou znázorněny v grafu 14.



Graf 14: Pevnosti v tahu za ohybu polymer-cementových malt

Nejvyšších a zároveň srovnatelných ohybových pevností bylo dosaženo u referenčních těles, konkrétně z receptur CSO25 a CSO30. Tyto pevnosti dosahovaly hodnoty 9,6 MPa. Ohybové pevnosti receptury CSO35 byly o něco nižší, a to 8,9 MPa. Se zvyšující se teplotou byl zaznamenán pokles ohybových pevností, nejzřejměji pak u receptury CSO35, kdy maximální pokles pevností vzorků rychle ochlazovaných těles byl -52,8 %. Pevnost v tahu za rychle chlazených vzorků této receptury byla tedy poloviční oproti referenční hodnotě. Hodnota pevnosti v tahu za ohybu byla v tomto případě pouhých 4,2 MPa. Pokles ohybových pevností nastal také u těles zatížených teplotou 1200 °C, kdy hodnoty klesly o cca 7 % u receptur CSO30 a CSO35. U receptury CSO25 byl pokles pevnosti v tahu za ohybu oproti referenčním hodnotám o -21 %, kdy byla zaznamenána hodnota pevnosti v tahu za ohybu 7,5 MPa.

U alkalicky aktivovaných materiálů byl zaznamenán klesající trend hodnot ohybových pevností. Obecně vyšších pevností dosahovaly vzorky s amfibolitem, také poklesy hodnot těchto pevností byly nižší. Nejvyšší ohybová pevnost byla zaznamenána u referenčních vzorků, jak s amfibolitem, tak i s agloporitem, a to 7,3 MPa, resp. 5,2 MPa. Nejvyšší pokles ohybových pevností byl pak zaznamenán u rychle ochlazovaných vzorků, a to 2,7 MPa při použití agloporitu, a 3,4 MPa při použití amfibolitu jako plniva. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu byly tak oproti referenčním hodnotám téměř poloviční.

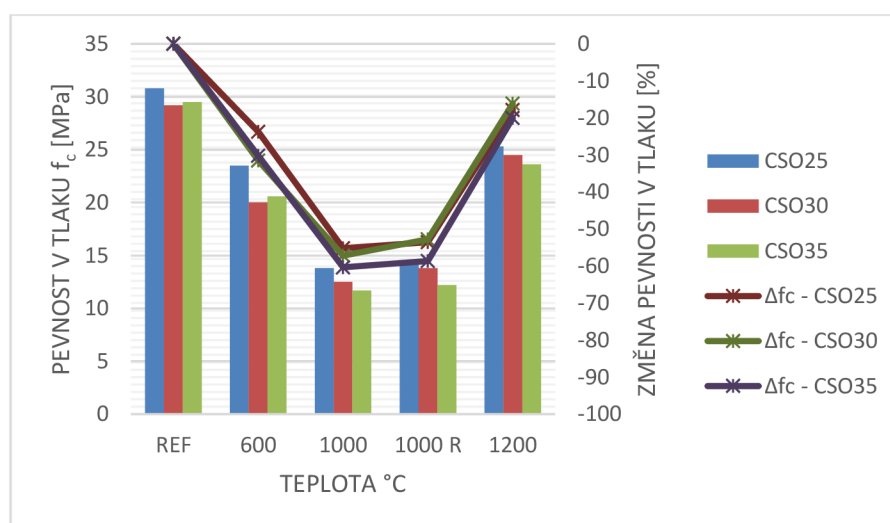


Graf 15: Pevnosti v tahu za ohybu AAM

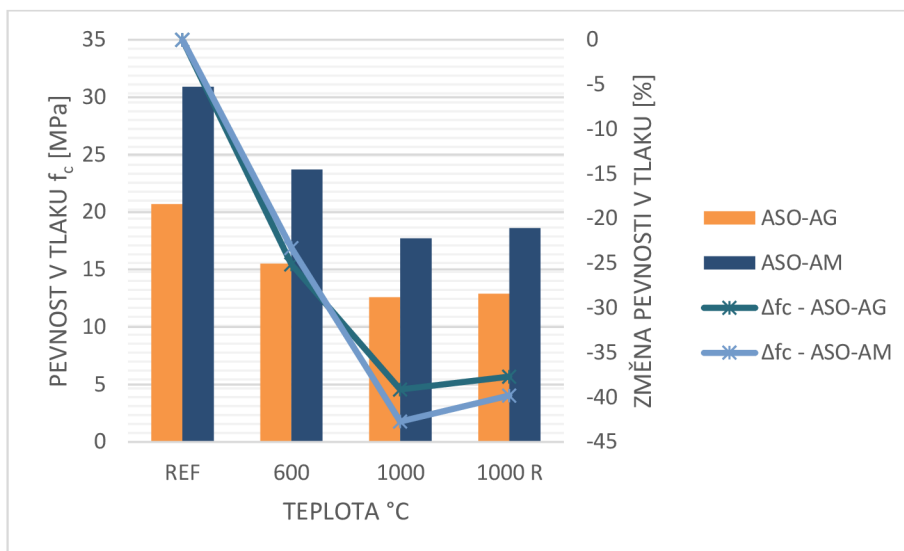
- Pevnost v tlaku

Níže je uvedeno posouzení tlakových pevností zkoušených malt. V grafu 16 jsou znázorněny pevnosti v tlaku polymer-cementových malt, včetně posouzení jejich procentuálních změn. V následujícím grafu (graf 17) jsou uvedeny pevnosti v tlaku alkalicky aktivovaných matric s použitím amfibolitu, resp. agloporitu jako plniva, včetně posouzení jejich změn, vyjádřených v % oproti referenčním hodnotám.

Průběh pevností v tlaku vzhledem k zatěžovacím teplotám byl obdobného charakteru jako průběh ohybových pevností. Stejně tomu tak bylo i v případě poklesu či nárůstu pevností. Pokles tlakových pevností se u polymer-cementových malt pohyboval v rozmezí 16-60 %. Největší pokles byl zaznamenán u vzorků zatížených teplotou 1000 °C, konkrétně se jednalo o vzorky receptury CSO35, kdy byl zaznamenán pokles o 60,3 % oproti referenčním hodnotám. Referenční vzorky receptury CSO25 vykazovaly nejvyšší pevnosti v tlaku, kdy bylo dosaženo hodnot 30,8 MPa. Tato hodnota splňuje požadavek normy ČSN EN 1504-3 na správkové malty, konkrétně byla splněna podmínka pro třídu R3, tedy správkovou maltu se statickou funkcí. Tuto podmínku splňovaly také referenční vzorky receptur CSO30, resp. CSO35, kdy bylo dosaženo hodnot tlakových pevností 29,2 MPa, resp. 29,5 MPa. Porovnáním tlakových pevností po zatížení teplotou 1000 °C, bylo vyšších hodnot pevností dosaženo u rychle zchlazených vzorků, a to u všech tří receptur polymer-cementových malt. Tento jev mohl být způsobem již dříve uvedeného zastavení rozkladu matrice při šokovém chlazení vodou. Pevnosti po zatížení teplotou 1200 °C byly oproti referenčním pevnostem v průměru o 16-20 % nižší.



Graf 16: Pevnosti v tlaku polymer-cementových malt



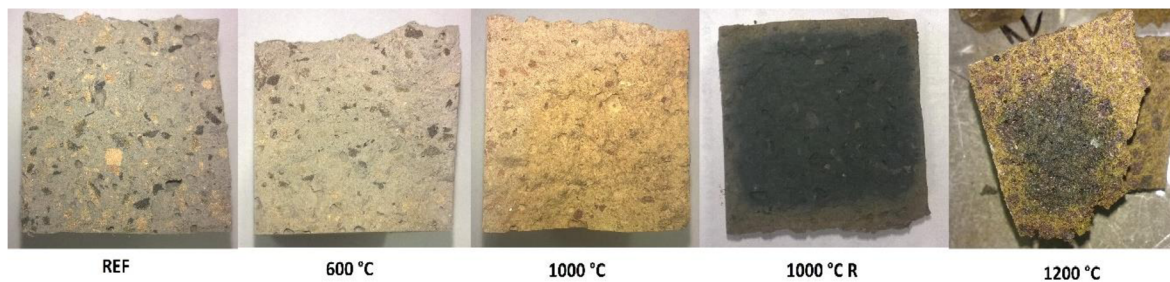
Graf 17: Pevnosti v tlaku AAM

Co se týká alkalicky aktivovaných malt, výrazně vyšších pevností v tlaku dosahovaly vzorky připravené s amfibolitem. Průběh pevností v závislosti na zatěžovací teplotě měl stejný trend jak u vzorků s amfibolitem, tak u vzorků s agloporitem, tento trend byl také obdobný jako průběh ohybových pevností. Nejvyšší pokles oproti referenčním hodnotám byl pozorován na vzorcích po zatížení teplotou 1000 °C, a to -43 % u vzorků s amfibolitem a -39 % u vzorků s agloporitem. Porovnáním pevností při pomalém a rychlém ochlazení bylo zjištěno, že stejně jako v případě polymer-cementových malt, byly zaznamenány vyšší pevnosti u vzorků rychle ochlazených, a to 12,9 MPa u vzorků s agloporitem a 18,6 MPa u vzorků s amfibolitem. Referenční vzorky amfibolitu také splňovaly podmínku ČSN EN 1504-3 pro správkové hmoty, konkrétně pro třídu R3.

- Posouzení vnitřní struktury, vliv rychlého chlazení

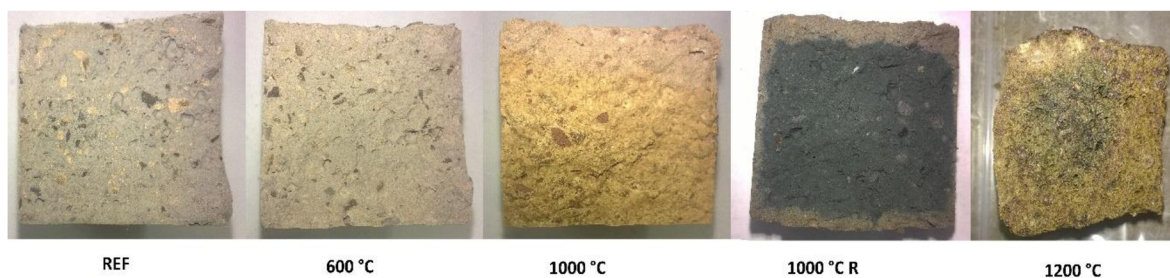
Posouzena byla také vnitřní struktura všech vyrobených těles na úlomcích po zkoušení pevnosti v tlaku. Na obrázku 31 lze pozorovat jak změnu barvy, tak změnu struktury vlivem zatěžovací teploty. Referenční vzorek neprokázal segregaci zrn agloporitu, viditelné jsou malé póry ve struktuře. Zajímavý a velmi podstatný rozdíl byl zpozorován při teplotě 1000 °C, vzorek zvolna chlazený je velmi světlý, s malým množstvím pórů. Kdežto rychle chlazený vzorek byl na povrchu hnědé barvy, a uvnitř černý. Světlejší vrstva na povrchu byla spíše hutného charakteru, kdežto vnitřní část byla více pórovitá. Vnitřní část

byla pravidelného tvaru. Vzorek vystavený teplotě 1200 °C byl spíše pórovitého charakteru, s ostrými hranami způsobenými spečením struktury.



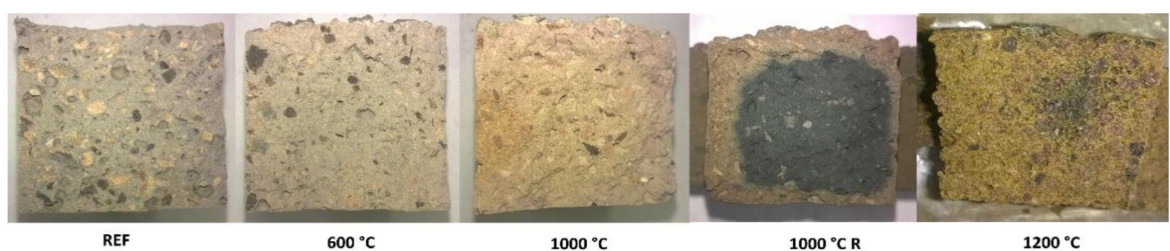
Obrázek 34: Lomové plochy, receptura CSO25

Stejné změny byly pozorovány u ostatních polymer-cementových malt, jak lze vidět na obrázcích 35 a 36 níže.



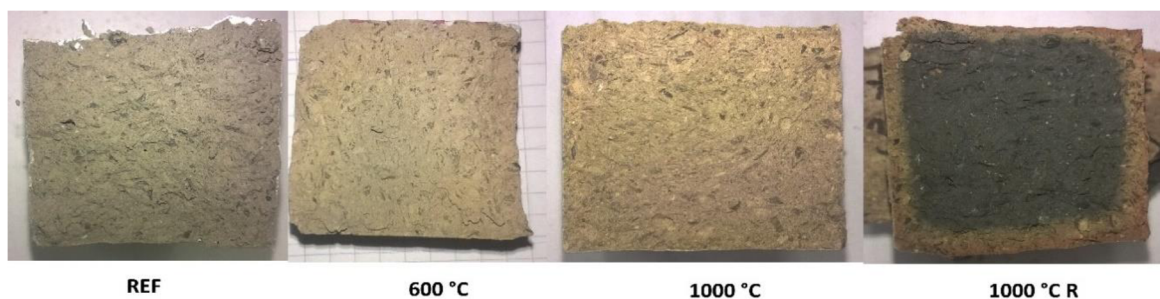
Obrázek 35: Lomové plochy, receptura CSO30

Polymer-cementová malta receptury CSO35 vykazovala největší pórovitou strukturu. Bylo to dáno také tím, že se zvyšujícím se obsahem strusky z Oslavan se zhoršovala zpracovatelnost směsi, proto při hutnění nebyly vyplněny všechny volné póry a dutiny cementovým tmelem.



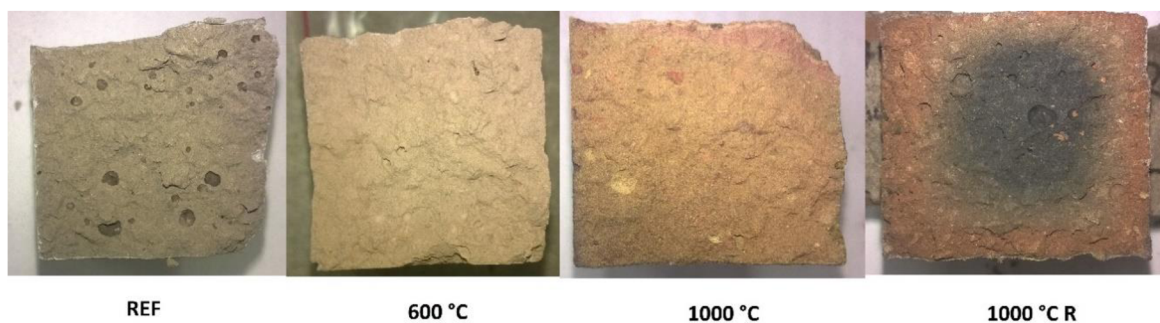
Obrázek 36: Lomové plochy, receptura CSO35

Struktura referenčních vzorků receptury ASO – AM s amfibolitem byla na první pohled hutnější než struktura vzorků s použitím agloporitu jako plniva. Pozorováno bylo také menší množství pórů, což znamenalo příznivý vliv alkalické aktivace. Tato receptura nebyla testována teplotou 1200 °C. Změny jsou znázorněny na obr. 37 níže.



Obrázek 37: Lomové plochy, receptura ASO – AM

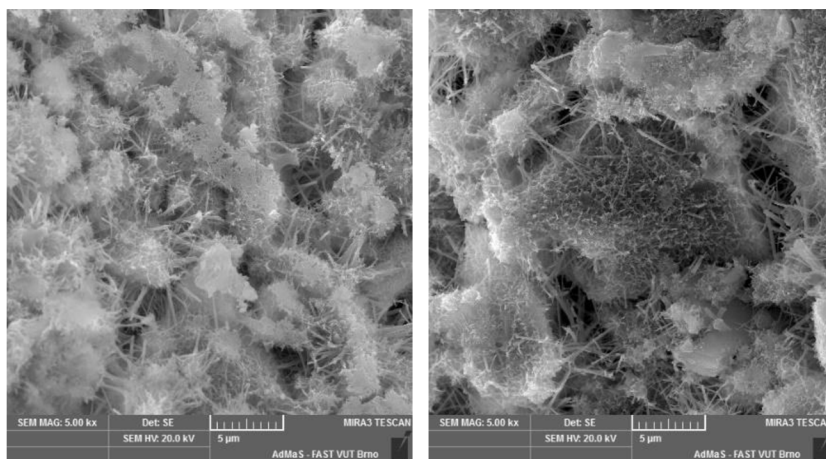
Výraznější póry a dutiny byly pozorovány u receptury ASO – AG, zejména v referenčním vzorku. Se zvyšující se zatěžovací teplotou bylo patrné postupné zaplňování pórů. Vzorky vystavené teplotě 1000 °C, které byly pomalu chlazeny v prostoru pece, na lomové ploše nevykazovaly příliš velký počet viditelných pórů. Zajímavý je také rozdíl mezi strukturou pomalu a rychle chlazeného vzorku po zatížení teplotou 1000 °C. Stejně jako u všech rychle chlazených vzorků byla vnitřní struktura černá a pórovitější než světlejší vnější vrstva.



Obrázek 38: Lomové plochy, receptura ASO – AG

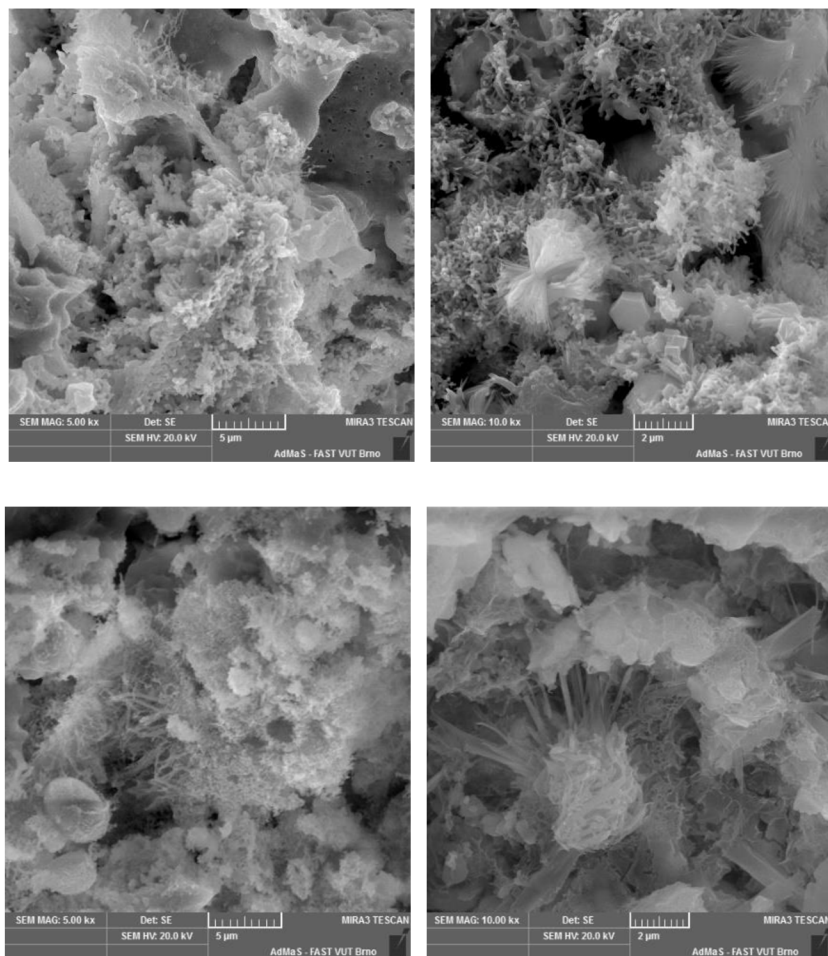
- Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

Kromě pevnostních charakteristik byla zkoumána také mikrostruktura pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. Pro lepší porovnání mikrostruktury byly ze zhotovených polymer-cementových malt vybrány dvě receptury, a to receptura s nejnižší (25 %) a nejvyšší (35 %) náhradou cementu struskou z Oslavan. Ve všech vzorcích polymer-cementových malt byla prokázána přítomnost C-S-H gelu, ovšem ve vzorcích s nejvyšším podílem strusky z Oslavan byla přítomnost C-S-H fáze nižší, viz obr. 39. Na snímcích jsou také patrné jehličky ettringitu. Přítomnost C-S-H fáze a ettringitu koresponduje s výstupy z XRD analýz, v případě receptury CSO25 byly totiž pozorovány vyšší difrakční linie charakterizující amorfni fázi, než u receptury CSO35.



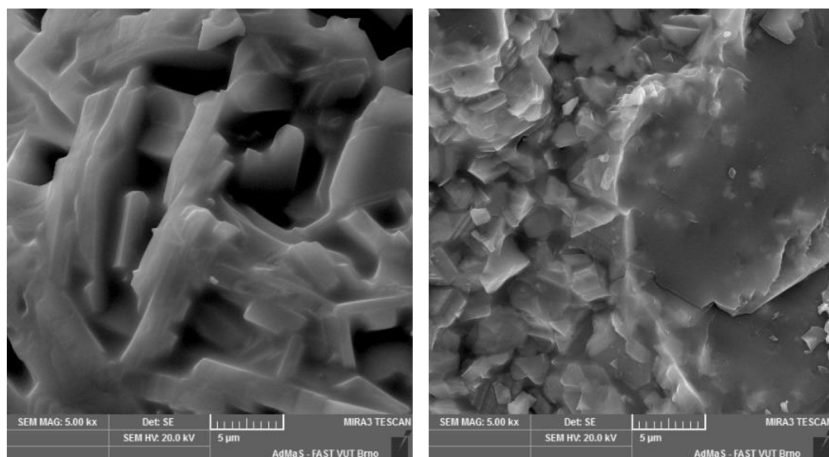
Obrázek 39: SEM snímky referenčních vzorků, vlevo receptura CSO25 (zvětšeno 5000x), vpravo receptura CSO35 (zvětšeno 5000x)

Na obr. 40 je viditelný rozdíl ve strukturách rychle a pomale ochlazovaných vzorků po zatížení teplotou 1000 °C.



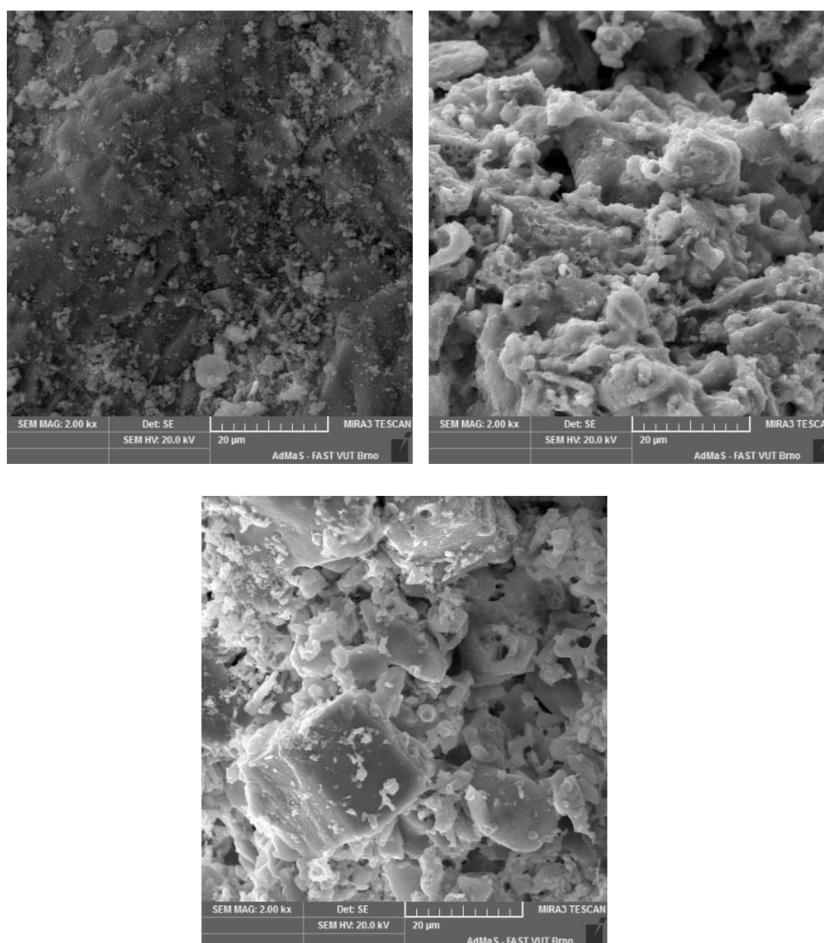
Obrázek 40: SEM snímky, porovnání pomalého (vlevo) a rychlého ochlazování. Nahoře receptura CSO25, vlevo zvětšení 5000x, vpravo 10000x. Dole receptura CSO35, vlevo zvětšení 5000x, vpravo 10000x

Obrázek 41 zachytil strukturu vzorků receptur CSO25 a CSO35 po teplotní expozici při 1200 °C. Viditelná je slinutá struktura, bez větších trhlin. Hrany krystalů jsou zaoblené.



Obrázek 41: SEM snímky vzorků po teplotní expozici při 1200 °C. Vlevo receptura CSO25, vpravo receptura CSO35. Zvětšení 5000x

Obrázek 42 zachycuje za mikrostrukturu alkalicky aktivované receptury ASO – AG, kde je viditelný vysoký podíl skelné fáze. Zaoblené krystaly můžou být krystaly wollastonitu.



Obrázek 42: SEM snímky alkalicky aktivované receptury ASO - AM. Nahoře vlevo referenční vzorek, vpravo pomalu ochlazovaný vzorek, dole rychle ochlazovaný vzorek. Zvětšení 2000x

- Rentgenová difrakční analýza

Mineralogické složení polymer-cementových kompozitů bylo ověřeno prostřednictvím XRD analýzy. Vyhodnocovány byly receptury CSO25, CSO35 a z nich vzorky referenční, vzorky zatížené teplotou 1000 °C s pomalým i rychlým způsobem chlazení, a vzorky vystavené teplotě 1200 °C. Z alkalicky aktivovaných materiálů byly analyzovány vzorky receptury ASO – AM, a to vzorek referenční, a dále vzorek zatížený teplotou 1000 °C s pomalým i rychlým chlazením.

V případě polymer-cementových malt byl v majoritní části nalezen křemen a dále minerály jako portlandit, mullit, anortit, kalcit nebo ettringit. Se zvyšující se teplotou byl prokázán rozklad, a tím i nepřítomnost portlanditu a ettringitu v rentgenogramech vzorků zatížených teplotou. Rozdílný způsob ochlazování zkušebních těles měl vliv především na obsah kalcitu, a to zejména v případě rychle ochlazovaného vzorku. U rychle ochlazovaného vzorku polymer-cementové malty bylo nalezeno také vyšší množství křemene, pík ettringitu byl také výraznější. Mineralogické složení vzorku testovaného po teplotní expozici na 1200 °C bylo také velmi rozdílné, kdy byly v majoritním množství nalezeny zejména minerály anortit, mullit (obsažený také v plnivu) a křemen.

U alkalicky aktivovaných materiálů byly nalezeny minerály odpovídající složení použitých výchozích materiálů. V majoritním množství byl nalezen gehlenit, ale také jílové minerály obsažené především v kamenivu, amfibolitu. S rostoucí teplotou byl pozorován vznik hydrotalcitu a gehlenitu. Ve vzorku rychle ochlazovaném byl nalezen především gehlenit. Vyhodnocení jednotlivých rentgenogramů je uvedeno v příloze této diplomové práce.

8. Diskuze výsledků

Experimentální část byla zaměřena na nalezení vhodného kompozitního systému na bázi silikátové matrice určené do prostředí vysokých teplot. Na základě poznatků z teoretické části byly vybrány vhodné primární i alternativní suroviny pro přípravu správkových malt. Nejdříve byl výzkum zaměřen na vývoj matrice. Na vytvořených matricích byly testovány základní fyzikálně-mechanické parametry, jakými jsou objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Prostřednictvím pozorovací pece byla sledována odolnost vůči rostoucí teplotě až do 1200 °C a případný vznik trhlin nebo objemové změny. Vybrané matrice byly také zkoumány pomocí rastrovací elektronové mikroskopie. Na základě výsledků z etapy zaměřené na matrice byly následně sestaveny receptury kompozitního systému, který by mohl být vhodný jako správková malta určená do prostředí zatížených extrémními teplotami. Podrobné shrnutí všech dosažených výsledků je zhodnoceno vždy v závěru příslušné etapy.

Při výběru pojivové složky byla zohledňována zejména teplotní stálost dané složky. Pro zhotovení nejběžnější polymer-cementové malty byl zvolen portlandský cement CEM I 42,5 R, jehož částečnou náhradu tvořila struska z Oslavan. Tato struska byla zvolena z toho důvodu, že představuje možný nevyužitý potenciál tohoto materiálu zejména kvůli jejímu již v minulosti vyprodukovanému a nyní skladovanému množství. Matrice vytvořená z portlandského cementu s 25, 30 a 35 % náhradou vykazovala dobré fyzikálně-mechanické parametry, proto bylo rozhodnuto, že v následujících etapách bude možné pracovat s těmito zvolenými množstvími náhrad cementu.

V případě alkalicky aktivovaných hmot byla pro aktivaci vybrána vysokopecní struska, struska z Oslavan a popílek z Dětmovic. Jako aktivátoru bylo využito sodného vodního skla. Pro ověření zejména teplotní odolnosti byly navrženy receptury s různým obsahem aktivátoru i různým silikátovým modulem s cílem vytvořit materiál odolný teplotě až 1200 °C. Nejlepší teplotní odolnosti a zároveň nejlepší pevnosti vykazovaly vzorky připravené alkalickou aktivací vysokopecní strusky, avšak tyto vzorky podlely značené deformaci již při zrání v laboratorním prostředí. Z toho důvodu byla v následující etapě ověřena varianta aktivované vysokopecní strusky se struskou z Oslavan, která sice nebyla tolik teplotně stabilní, ale mohla zamezit objemovým změnám při zrání. Matrice vytvořená alkalickou aktivací popílkou byla hůře zpracovatelná a největší problém se vyskytoval při jejím zrání. Vzorky mnohdy potřebovaly více než týden, aby byly ve ztuhlém stavu. Teplotní

odolnost byla srovnatelná s teplotní odolností aktivované strusky z Oslavan, kdy byl zaznamenán vznik trhlin a vnitřního rozpínání, proto bylo rozhodnuto, že se výzkum teplotně odolné matrice na bázi popílku nebude nadále zabývat.

Obsah aktivátoru a hodnota jeho silikátového modulu hráli při zkoušení teplotní odolnosti podstatnou roli. Bylo zjištěno, že nejpříznivější množství aktivátoru je 25 % z hmotností pojivových složek a hodnota silikátového modulu 1,6. Vyšší obsah vodního skla jako aktivátoru a nižší silikátový modul měly na teplotní odolnost negativní vliv. Nízký silikátový modul totiž přispívá k tvorbě výkvětů během zrání a vysoký obsah aktivátoru přispívá k tvorbě trhlin a rychlejšímu tavení. Jako nejlepší receptura matrice, která byla následně zhotovena i ve formě kompozitu s využitím dvou odlišných druhů kameniva, byla zvolena receptura se 70 % strusky z Oslavan, 30 % vysokopecní strusky ze Štramberku a 25 % vodního skla jako aktivátoru, se silikátovým modulem 1,6. Testováním v pozorovací peci byla prokázána teplotní odolnost i 1200 °C, konkrétně bylo testování ukončeno při teplotě až 1236 °C. Fyzikálně-mechanické parametry byly taktéž velmi dobré, pevnost v tlaku po 28 dnech byla 48 MPa. Experiment s alkalickou aktivací teplárenské strusky lze ale hodnotit kladně.

Při výběru plniva byly hodnoceny aspekty, jakými jsou mineralogické složení, teplotní odolnost a stálost a také dostupnost. Byly zvoleny dva druhy kameniva, jedno lehké pórovité – popílkový agloporit a druhé hutné – amfibolit. Popílkový agloporit byl zvolen zejména z důvodu prokázané teplotní odolnosti a stability při extrémních podmínkách. Kromě výše uvedených stabilních vlastností při teplotním zatěžování agloporitu je nutné také dodat, že se jedná o surovinu málo náročnou na energetické požadavky, neboť je vyráběn samovypálem. S tím jsou také spjaty jeho pořizovací náklady a tím i celové nižší náklady na výrobu hmot, které jej obsahují. Amfibolit pak zajišťoval vyšší pevnosti. Pro polymer-cementové hmoty byl použit popílkový agloporit, pro již výše zmíněnou teplotní stálost, která byla prokázána nepatrnými změnami rozměrů během teplotního zatěžování. Agloporit je výhodnější také v aspektu samošetřování vyrobené malty, jelikož při zrání postupně uvolňuje vodu. Za nevýhodu je však možné považovat dřívější nasáknutí vodou před mísením malt. Z výstupu testování malty s částečnou náhradou cementu v množství 25 % v polymer-cementové maltě bylo prokázáno velmi stabilní chování při zatěžování teplotou přes 1200 °C.

Vliv různého druhu chlazení byl posuzován při teplotě 1000 °C. Šokové chlazení vodou mělo simulovat okamžité hašení v případě vzniku požáru. Výrazně negativní vliv šokového chlazení byl prokázán zejména při stanovování pevnosti v tahu za ohybu, kdy byla změna ohybových pevností až o 50 % nižší než referenční hodnota. V porovnání s pomalým chlazením v prostoru pece byla tato hodnota nižší zhruba o 15 %. Co se týká pevností v tlaku, vzorky šokově chlazené vodou vykazovaly mírně vyšší pevnosti než vzorky pomalu ochlazované, avšak pokles pevností oproti referenční hodnotě byl okolo 58 %. Rozdílná byla pochopitelně i struktura vzorků po pomalém i rychlém ochlazování (viz obr. 32–38).

Vybrané receptury byly podrobeny také mikrostrukturní analýze s využitím rastrovacího elektronového mikroskopu. V alkalicky aktivované matrici, která kombinovala strusku z Oslavan a vysokopecní strusku, byla prokázána přítomnost hydratačních produktů v dutinách a pórech. Přestože na první pohled působila struktura vzorku na lomové ploše hutným dojmem, byly pozorovány také mikrotrhliny. Viditelné byly také zbytky skelné fáze strusky z Oslavan. V případě alkalicky aktivovaného popílku byly viditelné hydratační produkty aktivace, které se nacházely na jednotlivých zrnech. Některá zrna byla dobře začleněná ve struktuře. U polymer-cementových malt byla prokázána přítomnost C-S-H gelů a jehliček ettringitu, což také koresponduje s výsledky XRD analýzy. Na snímcích vzorku po zatížení teplotou 1200 °C byla velmi patrná struktura taveniny.

Mineralogické složení bylo analyzováno pomocí rentgenové difrakční analýzy. U polymer-cementových malt byly v majoritním množství nalezeny minerály jako křemen, mullit, anortit, ettringit, kalcit a jiné. Při zvyšující se expoziční teplotě byl zaznamenán rozklad portlanditu obsaženém v portlandském slínku, rozkládá se také kalcit. V případě alkalicky aktivovaných hmot byl v největší míře nalezen minerál gehlenit, ale také chlorit, obsažený v kamenivu, illit, merwinit.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že se náhrada portlandského cementu teplárenskou struskou z Oslavan v množství 25 % jeví jako nejhodnější. U referenčních vzorků byly dosaženy pevnosti v tlaku 30,8 MPa a změna pevnosti v tlaku po zatížení teplotou 1000 °C činila necelých 24 %, což lze při porovnání s běžně využívanými hmotami tohoto typu, resp. složení považovat za velmi dobrý výsledek. Jako nejméně výhodná náhrada se jevila náhrada cementu v množství 35 %, kdy byly úbytky pevnosti po vystavení zvyšující se teplotě nejznačnější. Při vyšším obsahu strusky z Oslavan také klesala zpracovatelnost celé směsi.

9. Závěr

Kompozitní materiály na bázi silikátové matrice zaujímají ve stavebnictví důležitou pozici. Předmětem nynějších výzkumů je vývoj materiálů se specifickými vlastnostmi, jakými jsou například pevnost, životnost, pozornost je také zaměřena na ochranu životního prostředí a redukci výrobních nákladů. Využití alternativních surovin pro výrobu těchto kompozitních materiálů je příslibem splnění těchto požadavků.

Správkové malty slouží především pro obnovu trvanlivosti betonových konstrukcí a zpětné uvedení do původního stavu těchto konstrukcí. Využívány mohou být jak cementové malty a betony, tak polymer-cementové malty a betony, které jsou modifikovány různými polymerními přísadami. Skýtá se také možnost náhrady cementové složky. Mezi suroviny, které jsou vhodnými alternativami k portlandskému cementu, lze za velmi výhodnou považovat vysokopecní strusku. Pokud je struska velmi jemně namletá, je schopna zajistit kompaktní strukturu malty, která je odolná i 1200 °C. Další vhodnou surovinou může být také popílek z vysokoteplotního spalování, nebo doposud nevyužitá škvára. Právě škváru lze efektivně využít jako pojivové složky.

Kromě polymer-cementových malt mohou v oblasti požárně odolných správkových hmot hrát roli také alkalicky aktivované materiály, které svými vlastnostmi často převyšují klasické kompozitní systémy na bázi silikátové matrice. Pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů se používají zejména druhotné suroviny z průmyslové výroby, což má pozitivní vliv na stále se měnící environmentální situace.

Zhodnocením teoretických poznatků bylo zjištěno, že vhodnými surovinami alternujícími portlandský cement jsou vysokopecní struska, popílky z vysokoteplotního spalování aj. Ohled je potřeba brát také na typ plniva, velmi vhodným plnivem jsou například pórovitá kameniva s nízkou tepelnou vodivostí a malými rozměrovými změnami. Pro omezení narušení povrchových vrstev, včetně omezení vzniku vnitřního tlaku, které vede k explozivnímu odprýskávání, je vhodné použití vláken na makromolekulární bázi. Jako nejvhodnější se jeví použití polypropylenových vláken, které ve struktuře kompozitu po vyhořívání zanechávají síť dutinek a trhlin, kterými jsou schopny unikat vzniklé páry z vnitřní struktury. Jako vhodné alkalicky aktivované materiály použitelné do prostředí vysokých teplot se jeví alkalicky aktivovaná struska, aktivovaný popílek, metakaolin nebo kombinace alkalicky aktivované strusky s popínkem.

V experimentální části této práce byla pozornost věnována jak vývoji matrice, tak i zkoumání chování vytvořeného kompozitního systému při jeho vystavení vysokým teplotám. Zohledněny byly suroviny, které jsou dobře dostupné a jejich potenciál je zatím příliš nevyužitý. V práci byla ověřena vhodnost použití strusky z Oslavan. Experimentální část ukázala, že se tato surovina je vhodná jak pro použití jako částečná náhrada cementu, tak i jako materiál pro alkalickou aktivaci. Nutné je ale dodat, že je potřeba výchozí surovinu upravit tak, aby byla reaktivní, tzn. namletím na požadovanou jemnost. Jako nejvhodnější množství náhrady se osvědčilo 25 % jemně namleté teplárenské škváry, kdy lze dosáhnout velmi dobrých pevností v tlaku, které jsou zachovány i při vystavení kompozitu teplotě až 1000 °C. Vzorky si při této zatěžovací teplotě zachovaly až 58 % pevnosti při pomalém ochlazení v prostoru pece a 52 % pevnosti v případě rychlého ochlazení prostřednictvím vody. Vyšší obsah přidané teplárenské strusky zapříčinil problém se zpracovatelností směsi, při zachování stejného vodního součinitele. V další části experimentu bylo ověřeno, zda je teplárenská škvára schopna alkalické aktivace. Jako aktivátor bylo zvoleno nejběžněji dostupné vodní sklo. Výsledky experimentu prokázaly, že strusku z Oslavan je vhodné aktivovat právě vodním sklem, a to v množství 25 % z pojivové složky, pro omezení vzniku trhlin při teplotním zatěžování je množné teplárenskou škváru kombinovat s vysokopecní struskou. Velmi dobré pevnostní charakteristiky byly zachovány i při zatěžování teplotou až do 1000 °C, kdy bylo zachováno až 61 % pevnosti v tlaku v případě pomalého ochlazení u receptury s agloporitem a 63 % pevnosti v tlaku v případě rychlého ochlazení, taktéž s použitím agloporitu jako plniva. Obdobné chování bylo zaznamenáno také v případě použití amfibolitu jako plniva, kdy si vzorky po zatížení teplotou 1000 °C zachovaly 58 % pevnosti v tlaku při pomalém, a 61 % pevnosti v tlaku při rychlém ochlazení.

Pro další výzkum by bylo možné zaměřit se na použití např. uhlíkových nanotrubiček, které jsou schopny tvořit nanovýztuž kompozitu – jsou totiž schopny překlenout i mikrotrhliny a tím tak zajistit ještě hutnější strukturu celého kompozitního systému. V případě alkalicky aktivovaných hmot by bylo možné se zaměřit na zvýšení jejich teplotní odolnosti, například snížením obsahu škváry.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MA, Qianmin, Rongxin GUO, Zhiman ZHAO, Zhiwei LIN a Kecheng HE. Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 93, 371-383 [cit. 2016-10-10]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131. ISBN 80-860-1357-X. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815006765>
- [2] HELA R., BODNÁROVÁ L., KŘÍŽOVÁ K., VÁLEK J. *Vytvoření postupů a receptur pro použití betonu s vyšší trvanlivostí vůči působení vysokých teplot v konstrukcích*. Dílčí výzkumná zpráva za rok 2010, CIDEAS – Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, listopad 2010.
- [3] *TZB info* [online]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13655-pozarni-odolnost-stavebnich-konstrukci>
- [4] FIALA, J. *Studium chování betonů při působení vysokých teplot*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [5] Alkalicky aktivované materiály geopolymery. [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- [6] ROVNANÍK, P. *Vliv působení vysokých teplot na stavební materiály na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátových pojiv*, Vědecké spisy Vysokého Učení Technického v Brně, 2012, Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 423, ISSN 1213- 418X.
- [7] DAVIDOVITS, J. *Geopolymer chemistry and applications*. 3rd ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, c2011, xi, 612 s. ISBN 978-2-9514820-5-0.
- [8] SVOBODA, L. A KOL. *Stavební hmoty* [online]. 2013. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH3v1.pdf>
- [9] BOHÁČ, M. *Vývoj cementových směsí pro sklovláknobetonový kompozit*. Brno, 2011. Disertační práce. Masarykova Univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Doc. RNDr. Miroslava Gregerová, CSc.
- [10] ADAM, A. Andi. *Strength and Durability Properties of Alkali Activated Slag and Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, A thesis submitted in fulfilment of the requirements for

the degree of Doctor of Philosophy, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering RMIT University Melbourne, Australia August 2009.

[11] DUXON, P., PROVIS, J.L.: *Designing precursors for geopolymers*. J. Am. Ceram. Soc. 91, 2008. pp. 3864-3869.

[12] ROVNANÍK, P. *CJ059 – Teoretické základy speciálních stavebních hmot*. Přednášky, 2016

[13] Fly ash. *SEPCO Environment* [online]. Dostupné z: <http://www.sepcoenvironment.com/ash-carbon/>

[14] CHAO, li, HENGHUN a li LONGTU. 2010. *The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements*. Cement and Concrete Research 40: 1341–1349

[15] Ambroise, M. Murat, J. Pera, *Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: V. Extension of the research and general conclusions*, Cem.Concr. Res. 15 (1985) 261–268

[16] AUTEF, A., JOUSSEIN, E., POULESQUEN, A., GASGNIER, G., PRONIER, S., SOBRADOS, I., SANZ, J., ROSSIGNOL, S. *Influence of metakaolin purities on potassium geopolymer formulation: The existence of several networks*. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, vol. 408, s. 43–53

[17] VARGA, G. *The structure of kaolinite and metakaolinite*. 2007. Constantine the Philosopher University.

[18] Glukhovskiy, V. D. *Slag-alkali concretes produced from fine-grained aggregate*. Kiev, USSR: Vyssha Shkola Publisher, 1981

[19] PHAIR, J.W., VAN DEVENTER, J.S.J.: *Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers*. Minerals Engineering, Vol. 14, No. 3, 2001, pp. 289-304.

[20] Hydroxid sodný, Wikipedia, otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2016-10-18]. Dostupné z http://cs.wikipedia.org/wiki/Hydroxid_sodn%C3%BD

- [21] Hydroxid draselný, Wikipedia, otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2016-10-18]. Dostupné z https://cs.wikipedia.org/wiki/Hydroxid_draseln%C3%BD
- [22] Uhličitan sodný, Wikipedia, otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2016-10-18]. Dostupné z https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhli%C4%8Ditan_sodn%C3%BD
- [23] Uhličitan draselný, Wikipedia, otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2016-10-18]. Dostupné z https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhli%C4%8Ditan_draseln%C3%BD
- [24] NIEDERLE, P. *Náhrada metakaolinu jako suroviny pro výrobu geopolymérů*. Olomouc, 2014. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geologie. Vedoucí práce RNDr. Petr Sulovský, Ph.D.
- [25] *Vodní sklo* [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.vodnisklo.cz/cz/clanky/zakladni-informace-o-vodnim-skle>
- [26] Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D.: *Alkali-Activated Cements and Concretes*. Taylor & Francis. New York. 2006. pp. 376. ISBN 0-415-70004-3
- [27] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A. REVUELTA, D.: *Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cements*. In Proceeding of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009), Bath, UK, 6-9 September, 2009. pp. 1-15
- [28] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A., CRIADO, M.: Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. In Cement and Concrete Research 35, 2005. pp. 1204-1209.
- [29] DAI, L., CHENG, J.: An investigation on BFS-fly ash-alkali systems, 1988, Bulletin of Chinese Silicate Society, p. 25-32.
- [30] BIJEN, J., WALTJE, H.: Alkali activated slag-fly ash cements. 3rd International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-114, Trondheim, Norway, 1989. pp. 565-578.
- [31] PUERTAS, F., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.: Mineralogical and microstructural characterization of alkali-activated fly ash/slag pastes. Cement and Concrete Composites 25, 2003. pp. 287-292.

- [32] ROVNANÍK, P., BAYER, P., ROVNANÍKOVÁ, P. Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures. *Construction and Building materials*. 2013, vol. 47, s. 1479–1487.
- [33] ROVNANÍK, P. Fly ash geopolymer after exposure to elevated temperature: mechanical properties and microstructure. In: BÍLEK, V., KERŠNER, V., *Non-Traditional Cement & Concrete IV*, Brno, 27–30 June, 2011, Česká republika. První vydání. Brno University of Technology, 2011, s. 130–138, ISBN 978-80-214-4301-3.
- [34] ZUDA, L., J. DRCHALOVÁ, P. ROVNANÍK, P. BAYER, Z. KERŠNER a R. ČERNÝ. Alkali-activated aluminosilicate composite with heat-resistant lightweight aggregates exposed to high temperatures: Mechanical and water transport properties. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2010, **32**(2), 157-163. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.009. ISSN 09589465.
- [35] LEE, N.K., K.T. KOH, G.H. AN a G.S. RYU. Influence of binder composition on the gel structure in alkali activated fly ash/slag pastes exposed to elevated temperatures. *Ceramics International* [online]. 2017, **43**(2), 2471-2480. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.11.042. ISSN 02728842.
- [36] TÜRKER, Hakan Tacettin, Müzeyyen BALÇIKANLI, İbrahim Halil DURMUŞ, Erdoğan ÖZBAY a Mustafa ERDEMİR. Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **104**, 169-180. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.070. ISSN 09500618.
- [37] ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky
- [38] *Tescan* [online]. Dostupné z: <http://www.tescan.com/technology/sem/mira3>
- [39] LACH, Vladimír; DAŇKOVÁ, Marcela. *Mikrostruktura stavebních látek*. 2. vydání. Brno: VUT, 178s.
- [40] POČEKAJLO, V., *Vlastnosti cementových kompozitních materiálů s plazmatem upravenými polypropylenovými vlákny*, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, FAST, 2013.
- [41] HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* [online]. 2013-01-1, **61**(1), - [cit. 2016-11-30].

DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013. ISSN 0239-7528. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/bpasts.2013.61.issue-1/bpasts-2013-0013/bpasts-2013-0013.xml>

[42] WALD, F. a kol. Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 336 s. ISBN 80-01-03157-8

[43] *Manuál silničních tunelů* [online]. Dostupné z: <http://tunnels.piarc.org/cs/provozni-bezpecnostni-doporuceni-protipozarni-odolnost/reakce-materialu>

[44] ČSN EN 13501-1+A1 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010

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

[46] AYDIN, Serdar. Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice. *Fire Safety Journal* [online]. 2008, **43**(8), 610-617. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.02.001. ISSN 03797112. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711208000167>

[47] WON, Jong-Pil, Hee-Byoung KANG, Su-Jin LEE, Sang-Woo LEE a Joo-Won KANG. Thermal characteristics of high-strength polymer-cement composites with lightweight aggregates and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials* [online]. 2011, **25**(10), 3810-3819. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.023. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811000699>

[48] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011

[49] 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

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Fáze požáru [42] | 13 |
| Obrázek 2: Děje probíhající u různých typů kameniva za působení zvýšené teploty [4] ... | 17 |
| Obrázek 3: Část stavby z gruntosilikátových bloků [5] | 22 |
| Obrázek 4: Zjednodušený princip geopolymerace [6] | 24 |
| Obrázek 5: Názvy a struktury amorfních fází geopolymeru [24]..... | 25 |
| Obrázek 6: Struktura geopolymeru podle Davidovitz [24] | 26 |
| Obrázek 7: Aktuální pohled na strukturu AAM [24] | 26 |
| Obrázek 8: Pucolány [12]..... | 27 |
| Obrázek 9: Třífázový diagram $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ chemického složení vysokopecní strusky při obsahu $\text{MgO} = 10\%$ (převzato ze Satarin, 1974) [9] | 29 |
| Obrázek 10: Částice popílku – plerosféra vyplněná cenosférami menších rozměrů [13]... | 32 |
| Obrázek 11: Schéma kalcinace kaolinitu [14]..... | 33 |
| Obrázek 12: Idealizovaná struktura metakaolinu [17] | 34 |
| Obrázek 13: Teoretický model reakčního mechanismu AAS [27]..... | 38 |
| Obrázek 14: Dvoustupňový model alkalické aktivace popílku [28] | 39 |
| Obrázek 15: Normová teplotní křivka [37] | 46 |
| Obrázek 16: Teplotní zatěžování s pozvolným a šokovým chlazením | 47 |
| Obrázek 17: Zrna strusky s Oslavan v pozorovací peci | 52 |
| Obrázek 18: Zrna strusky z Oslavan po teplotní expozici v pozorovací peci | 52 |
| Obrázek 19: Ocelová forma 40 x 40 x 160 mm pro výrobu těles z etapy III..... | 59 |
| Obrázek 20: Vzorek v peci při teplotě 1000 °C | 60 |
| Obrázek 21: Rozžhavený zkušební trámeček vytažený z pece při teplotě 1000 °C..... | 60 |
| Obrázek 22: Snímky z pozorovací pece, receptura APD, etapa I..... | 66 |
| Obrázek 23: Receptura APG, etapa I. Vlevo vzorek před teplotní expozicí, vpravo vzorek po teplotní expozici | 66 |
| Obrázek 24: Snímky z pozorovací pece, receptura ASS, etapa I | 66 |
| Obrázek 25: Vzorek receptury ASS. Vlevo před teplotní expozicí, vpravo po teplotní expozici..... | 67 |
| Obrázek 26: Snímky z pozorovací pece, receptura ASO, etapa I..... | 67 |
| Obrázek 27: SEM snímky zreagovaných zrn popílku receptury APD. Nahoře vlevo zvětšení 2000x, vpravo 5000x. Dole zvětšení 10000x | 68 |
| Obrázek 28: Snímky z pozorovací pece, receptura ASO30VS 1,1, etapa II | 73 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 29: Vzorek receptury ASO30VS 1,1 po teplotní expozici v pozorovací peci, etapa II | 74 |
| Obrázek 30: Snímky z pozorovací pece, receptura ASO25VS 1,6, etapa II | 74 |
| Obrázek 31: SEM snímky matrice ASO25VS 1,6. Nahoře vlevo zvětšení 100x, vpravo 2000x, dole vlevo zvětšení 10000x, vpravo 1000x | 75 |
| Obrázek 32: Povrch rychle ochlazovaného vzorku receptury CSO30 | 78 |
| Obrázek 33: Povrch rychle ochlazovaného vzorku receptury ASO – AM | 79 |
| Obrázek 34: Lomové plochy, receptura CSO25 | 86 |
| Obrázek 35: Lomové plochy, receptura CSO30 | 86 |
| Obrázek 36: Lomové plochy, receptura CSO35 | 86 |
| Obrázek 37: Lomové plochy, receptura ASO – AM | 87 |
| Obrázek 38: Lomové plochy, receptura ASO – AG | 87 |
| Obrázek 39: SEM snímky referenčních vzorků, vlevo receptura CSO25 (zvětšeno 5000x), vpravo receptura CSO35 (zvětšeno 5000x) | 88 |
| Obrázek 40: SEM snímky, porovnání pomalého (vlevo) a rychlého ochlazování. Nahoře receptura CSO25, vlevo zvětšení 5000x, vpravo 10000x. Dole receptura CSO35, vlevo zvětšení 5000x, vpravo 10000x | 89 |
| Obrázek 41: SEM snímky vzorků po teplotní expozici při 1200 °C. Vlevo receptura CSO25, vpravo receptura CSO35. Zvětšení 5000x | 90 |
| Obrázek 42: SEM snímky alkalicky aktivované receptury ASO - AM. Nahoře vlevo referenční vzorek, vpravo pomalu ochlazovaný vzorek, dole rychle ochlazovaný vzorek. Zvětšení 2000x | 91 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Koeficienty lineární tepelné roztažnosti [2] | 17 |
| Tabulka 2: Požadované základní parametry správkových malt [45] | 20 |
| Tabulka 3: Mineralogické složení strusky [10] | 28 |
| Tabulka 4: Fáze přítomné v popílcích | 31 |
| Tabulka 5: Chemické složení vysokopecní strusky Štramberk | 51 |
| Tabulka 6: Průměrné chemické složení popílku Dětmárovice | 53 |
| Tabulka 7: Vybrané receptury, etapa I | 62 |
| Tabulka 8: Vybrané receptury, etapa II | 70 |

| | |
|---|----|
| Tabulka 9: Vybrané receptury – kompozit, etapa III..... | 77 |
|---|----|

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|--|----|
| Graf 1: Pevnost v tlaku AAM zhotoveného z popílku a strusky, vystaveného vysokým teplotám [35] | 42 |
| Graf 2: Síťový rozbor agloporitu | 54 |
| Graf 3: Síťový rozbor amfibolitu | 55 |
| Graf 4: Objemové hmotnosti, etapa I | 63 |
| Graf 5: Pevnosti v tahu za ohybu, etapa I..... | 64 |
| Graf 6: Pevnosti v tlaku, etapa I | 65 |
| Graf 7: Objemové hmotnosti, etapa II | 71 |
| Graf 8: Pevnosti v tahu za ohybu, etapa II | 72 |
| Graf 9: Pevnosti v tlaku, etapa II..... | 73 |
| Graf 10: Rozměrové změny polymer-cementových malt | 79 |
| Graf 11: Změny rozměrů AAM..... | 80 |
| Graf 12: Objemové hmotnosti polymer-cementových malt..... | 81 |
| Graf 13: Objemové hmotnosti alkalicky aktivovaných malt..... | 82 |
| Graf 14: Pevnosti v tahu za ohybu polymer-cementových malt | 82 |
| Graf 15: Pevnosti v tahu za ohybu AAM | 83 |
| Graf 16: Pevnosti v tlaku polymer-cementových malt..... | 84 |
| Graf 17: Pevnosti v tlaku AAM..... | 85 |

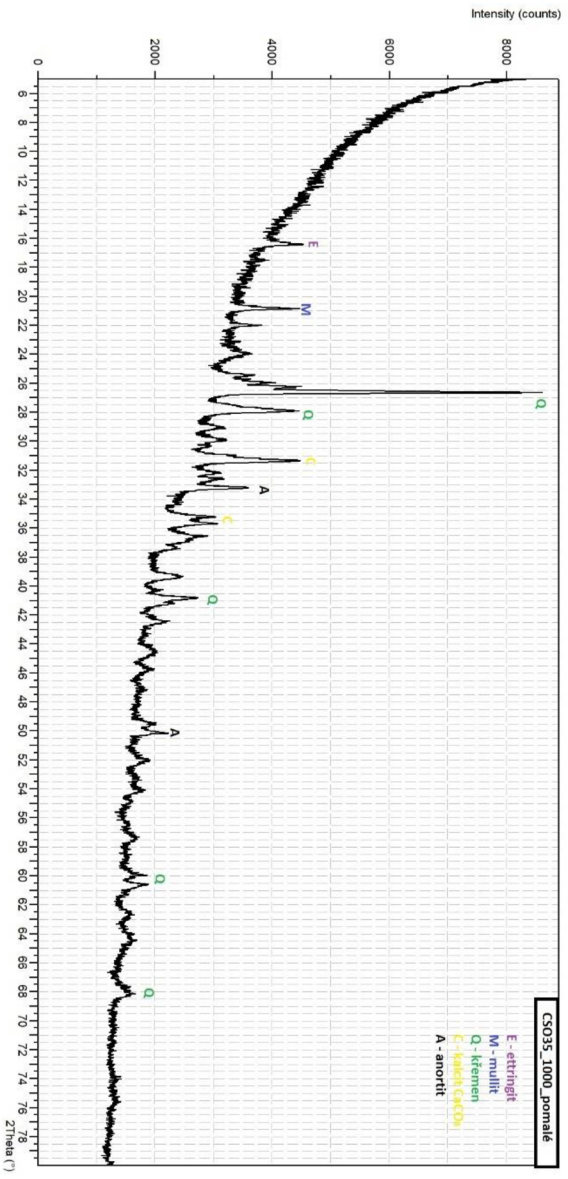
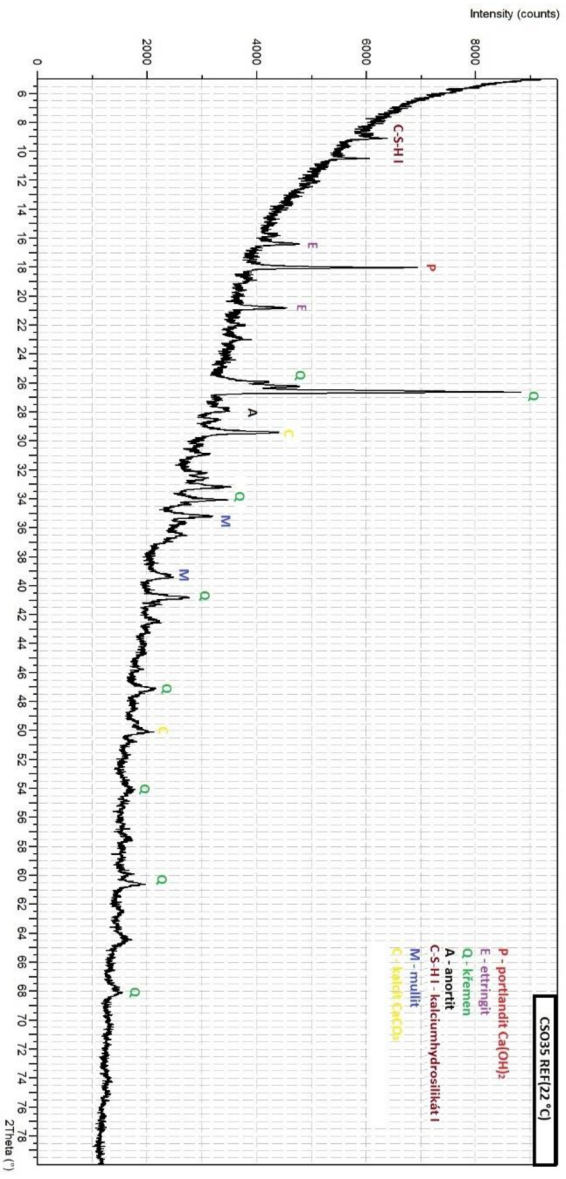
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

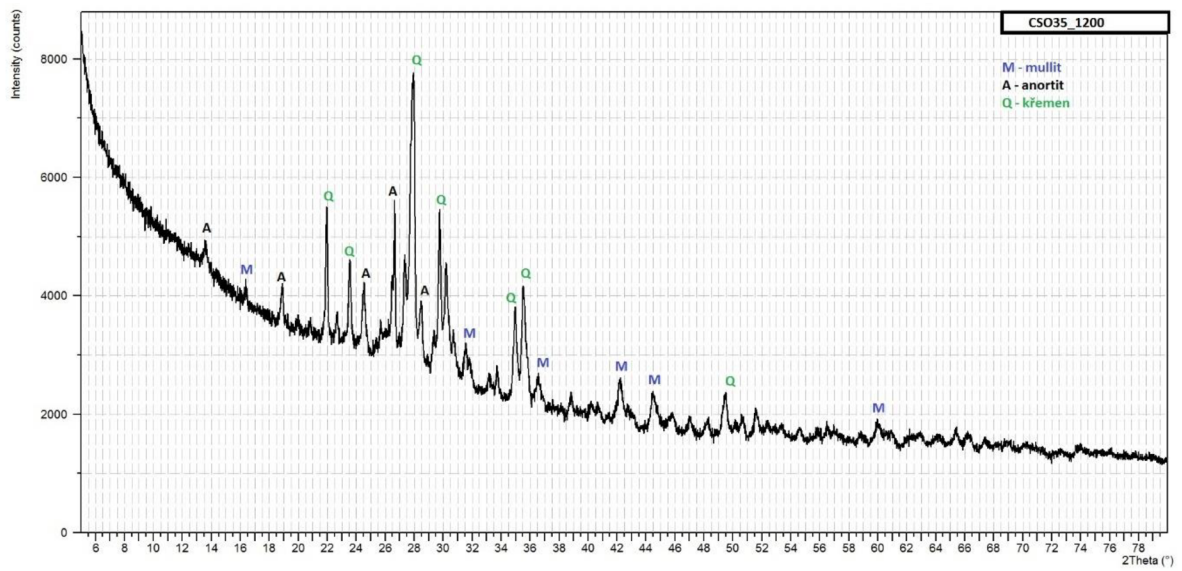
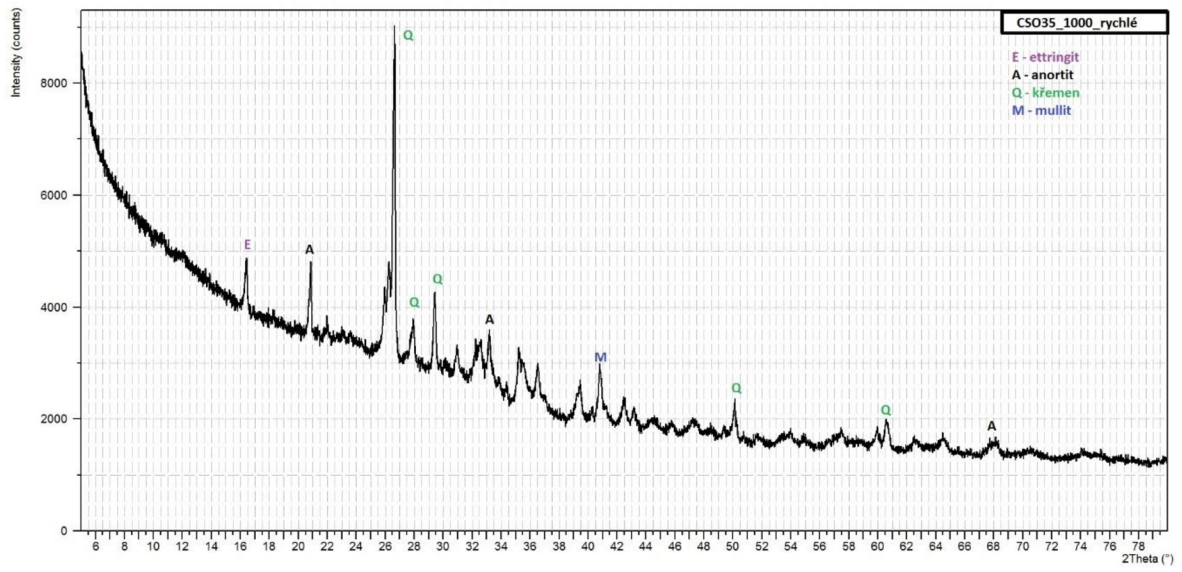
| | |
|-------|---|
| PCC | cementové malty modifikované polymery |
| AAM | alkalicky aktivované materiály |
| AAS | alkalicky aktivovaná struska (alkali activated slag) |
| DP | stupeň depolymerace |
| K_b | index bazicity |
| PKS | pevný křemičitan sodný |
| AAP | alkalicky aktivovaný popílek |
| XRD | rentgenová difrakční analýza (z ang. X-ray Diffraction) |
| PC | portlandský cement |
| VS | vodní sklo |
| SO | struska Oslavany |
| SS | vysokopeční struska Štramberk |
| PP | polypropylen |
| f_b | pevnost v tahu za ohybu |
| f_c | pevnost v tlaku |

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: vyhodnocení XRD analýz

- Receptura CSO35





- Receptura ASO – AM

