



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Experimentální centrum**

Experimentální analýza vláknových kompozitů zatížených vysokými teplotami

**Experimental analysis of fibre-reinforced composites after
high temperatures loading**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Ondřej Holčapek

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: prof. Ing. Petr Konvalinka, CSc., FEng.

Praha, 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Ondřej Holčapek

Název disertační práce:

Experimentální analýza vláknových kompozitů zatížených vysokými teplotami

Prohlašuji, že jsem uvedenou doktorskou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Petra Konvalinky, CSc., FEng.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu: *“Vláknové kompozity na bázi cementu pro vysokoteplotní aplikace”* – GAČR P104/12/0791.

V Praze dne 25. 1. 2019

.....
podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu katedry Experimentální centrum a svému školiteli prof. Ing. Petru Konvalinkovi, CSc., FEng., za jeho odborné rady, cenné připomínky, motivaci a inspiraci pro dané téma, poskytnutí technického a materiálního zázemí pro tvorbu disertační práce a možnost realizovat provedené experimenty v laboratořích Experimentálního centra, bez nichž by tato práce nevznikla.

Velký osobní dík patří Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D., za jeho rady v oblasti technologie betonu, za návrh složení cementového kompozitu, zhotovení snímků z elektronového mikroskopu, inspiraci pro výzkum a další cenné podněty nezbytné nejen pro vznik disertační práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval Ing. Filipu Vogelovi, Ph.D., a Ing. Jaroslavě Kořátkové za pomoc při výrobě vzorků a Ing. Jaroslavu Pokornému, Ph.D., za provedené práce na rtuťovém porozimetru.

Rovněž bych chtěl poděkovat své nejbližší rodině za projevenou důvěru, podporu a především trpělivost během doktorského studia.

Práce vznikla s podporou Laboratoře skenovací elektronové mikroskopie SEM na Fakultě stavební, ČVUT Praha (CE-SEM Lab).

Abstrakt

Disertační práce se tematicky člení na dvě základní části. Obsahuje teoretickou rešerši věnující se oblasti žárobetonů a žáruvzdorných kompozitů s komplexnějším zaměřením na problematiku hlinitanového cementu. Součástí teoretické rešerše je rovněž studium účinku vysokých teplot na cementové kompozity. Dále je věnována pozornost různým typům vláken vhodných k vyztužení cementových kompozitů uplatnitelných v prostředí vysokých teplot. Dílčí část popisuje účinek hydrotermálního ošetřování na cementové jemnozrnné kompozity. Součástí disertační práce je kapitola shrnující metodiku použitých experimentálních metod a popisující materiály, ze kterých se skládaly studované cementové kompozity. Stěžejní část disertační práce spočívá v experimentálním programu sestávajícím se z více dílčích a prohlubujících částí. Převažujícím zkušebním vzorkem sloužícím pro potřeby provedených analýz byl trámeček o rozměrech 40×40×160 mm, na kterém proběhla analýza objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku (měřeno na fragmentech po ohybové zkoušce), dynamického modulu pružnosti a lomové energie. Vzhledem k zaměření disertační práce byly uvedené parametry vyšetřovány na vzorcích referenčních – vysušených – a na vzorcích vystavených teplotnímu zatížení v úrovni 600 °C a 1000 °C po dobu 240 minut. Prvotní experimenty byly provedeny na cementových pastách z hlinitanového cementu o odlišných hodnotách vodního součinitele. Dále byl proveden rozsáhlý experimentální program zaměřený na studium vlivu substituce hlinitanového cementu metakaolinem či cihelným prachem na mechanické parametry před a po výpalu. Studovány byly rovněž odlišné dávky čedičových vláken (maximálně 4 %) a keramických vláken (maximálně 8 %). Hlavní plnivovou složkou použitého kompozitu tvořily dvě frakce přírodního, drceného čedičového kameniva (0-4 mm a 2-5 mm). Na vybraných směsích z hlediska multikriteriálního hodnocení dosažených mechanických a reologických vlastností proběhla detailnější analýza spočívající v provedení teplotního zatížení odstupňovaném po 100 °C do maximální teploty 1000 °C. Dále byl vyšetřován vliv hydrotermálních podmínek ošetřování na residuální mechanické vlastnosti po teplotním zatížení v případě směsí s cihelným prachem, čedičovými a keramickými vlákny. Pro ověření chování vybraných kompozitů na vzorcích odpovídajících reálným prvkům byly zhotoveny obdélníkové desky. Zmíněné deskové vzorky o rozměrech 400×300×38 mm byly podrobeny teplotnímu zatěžování v úrovni 600 °C a 1000 °C a rovněž cyklickému teplotnímu zatěžování se šesti opakováními. Analýzu mechanických parametrů doplnilo studium pórové struktury. Vliv teplotního zatížení v úrovni 600 °C a 1000 °C na samotná čedičová vlákna byl analyzován za použití elektronové mikroskopie.

Klíčová slova: hlinitanový cement, čedičové kamenivo, čedičová vlákna, keramická vlákna, metakaolin, cihelný prach, základní a mechanické vlastnosti, lomová energie, deskové vzorky, hydrotermální ošetřování, autokláv.

Abstract

The dissertation consists of two main parts. It contains a theoretical state of the art research that is focused on refractory composites with more complex focus on alumina cement. The state of the art part also contains a study of the effect of elevated temperatures on cement composites. This part also describes various types of fibers suitable for composites applicable in high temperature environments. The part is focused on the effect of hydrothermal curing conditions on cement based composites. There is also a chapter summarizing the methodology of performed experimental methods and describing the input materials for studied fiber-reinforced composite. The main part of the dissertation consists of an experimental program consisting of several partial and deepening parts. The predominant test specimen for performed experimental program was a prism with dimensions 40×40×160 mm. This specimen was used for determination of bulk density, flexural strength, compressive strength, dynamic modulus of elasticity and fracture energy. Due to the aim of the dissertation, above mentioned parameters were investigated on dried specimens (reference) and on specimens exposed to thermal loading (600 °C and 1000 °C for 240 minutes). The introduction of experimental program contains the study of alumina cement pastes with different water to cement ratio. An extensive study was focused on the effect of aluminous cement substitution with metakaolin or ceramic powder on mechanical characteristics before and after thermal loading. Different dosage of basalt fibers (max. 4 %) and ceramic fibers (max. 8 %) were also studied. Natural crushed basalt aggregate (0-4 mm and 2-5 mm) was the filler of investigated composite. Based on multi-criteria evaluation of mechanical and rheological properties, selected mixtures were analysed after detailed thermal loading with gradient 100 °C (from 100 °C to 1000 °C). In addition, the effect of hydrothermal curing conditions on residual mechanical properties after thermal loading was also investigated. In order to verify the behaviour of selected composite on the real elements, the rectangular slabs with dimensions of 400×300×38 mm were produced. These slabs were exposed to thermal loading of 600 °C and 1000 °C as well as cyclic thermal loading (six cycles) of the same level. The analysis of mechanical properties was supplemented by the pore structure study. The influence of thermal loading on basalt fibers itself was analysed by using electron microscopy.

Key words: alumina cement, basalt aggregate, basalt fibres, ceramic fibres, metakolin, ceramic powder, basic and mechanical properties, fracture energy, slabs specimen, hydrothermal curing, autoclave device.

Poděkování	I
Abstrakt	III
Abstract.....	V
Obsah	VII
Kapitola 1	
Úvod, motivace a východiska	1
1.1 Cíle disertační práce	2
1.2 Obsah disertační práce	3
Kapitola 2	
Současný stav problematiky	5
2.1 Žárovzdorné materiály	5
2.1.1.1 Hydraulická vazba	6
2.1.1.2 Keramická vazba.....	6
2.1.1.3 Chemická vazba	7
2.2 Žárovbetony	7
2.2.1.1 Dle obsahu cementu	7
2.2.2 Hlinitanový cement	8
2.2.2.1 Výroba hlinitanového cementu	9
2.2.2.2 Hydratační teplo	11
2.2.2.3 Hydratace hlinitanových cementů	11
2.2.2.4 Rychlost hydratace	12
2.2.2.5 Konverze	13
2.2.2.6 Hydratace hlinitanových cementů v prostředí dalších aktivních materiálů	14
2.2.2.7 Změny v hlinitanových cementech vlivem vysokých teplot	14
2.2.2.8 Vybrané komerčně dostupné hlinitanové cementy	15
2.3 Vlákna v kompozitech	16
2.3.1 Azbestová vlákna	18
2.3.2 Čedičová vlákna	18
2.3.3 Keramická vlákna.....	19
2.3.4 Uhlíková vlákna	19
2.3.5 Skleněná vlákna.....	20
2.3.6 Textilní beton a vysoké teploty	21
2.4 Vliv vysokých teplot na portlandský cement.....	21
2.4.1 Explosivní odprýskávání („ <i>explosive spalling</i> “)	23
2.4.1.1 Vliv okrajových podmínek.....	24
2.4.1.2 Použití vláken.....	24
2.5 Hydrotermální ošetřování	26
2.5.1 Kompozity na bázi portlandského cementu v hydrotermálních podmínkách.....	27
2.5.2 Textilní beton v autoklávu.....	29
2.5.3 Pucolánově aktivní materiály v hydrotermálních podmínkách	29
2.5.4 Hlinitanový cement v hydrotermálních podmínkách	30
Kapitola 3	
Metodologie a materiály	31
3.1 Metody a vyšetřované parametry.....	31
3.1.1 Objemová hmotnost	31
3.1.2 Pevnost v tahu za ohybu	32
3.1.3 Pevnost v tlaku	32
3.1.4 Lomová energie.....	32
3.1.5 Dynamický modul pružnosti	33
3.1.1 Rtuťová porozimetrie	35

3.2	Teplotní zatěžování.....	35
3.3	Hydrotermální ošetřování	36
3.3.1	Postup hydrotermálního ošetřování	38
3.4	Použité materiály	39
3.4.1	Čedičové kamenivo	39
3.4.2	Hlinitanový cement	40
3.4.3	Metakaolin.....	41
3.4.4	Cihelný prach	41
3.4.5	Čedičová vlákna	42
3.4.6	Keramická vlákna.....	43
Kapitola 4		
	Experimentální program	44
4.1	Základní popis	44
4.2	Cementové pasty.....	45
4.2.1	Zpracovatelnost	45
4.2.2	Objemová hmotnost	45
4.2.3	Pevnost v tahu za ohybu.....	46
4.2.4	Lomová energie.....	47
4.2.5	Pevnost v tlaku	49
4.2.6	Dílčí závěr	49
4.3	Základní výzkum	51
4.3.1	Jednotlivé směsi	52
4.3.2	Proces míchání a ošetřování	54
4.3.3	Reologické vlastnosti	55
4.3.4	Dosažené výsledky	57
4.3.4.1	Objemová hmotnost	58
4.3.4.2	Pevnost v tlaku	60
4.3.4.3	Pevnost v tahu za ohybu.....	62
4.3.4.4	Lomová energie	64
4.3.5	Závěry a shrnutí.....	66
4.4	Teplotní zatěžování v rozmezí 100 °C až 1000 °C	67
4.4.1	Vyšetřované směsi.....	67
4.4.2	Teplotní zatěžování	68
4.4.3	Vyšetřované parametry, jejich hodnoty a diskuze	68
4.4.3.1	Objemová hmotnost	69
4.4.3.2	Pevnost v tlaku	70
4.4.3.3	Pevnost v tahu za ohybu.....	71
4.4.3.4	Lomová energie	73
4.4.3.5	Dynamický modul pružnosti	74
4.4.4	Dílčí závěr	75
4.5	Struktura čedičových vláken.....	76
4.5.1	Snímky z elektronového mikroskopu	77
4.6	Pórová struktura	79
4.7	Porovnání s nežáruvzdorným kompozitem.....	81
4.7.1	Výsledky	83
4.7.2	Dílčí závěr	87
4.8	Hydrotermální ošetřování	87
4.8.1	Kompozit s hlinitanovým cementem bez příměsí	88
4.8.2	Kompozit s čedičovými vlákny	90
4.8.2.1	Výsledky	90

4.8.3	Keramická vlákna.....	92
4.8.3.1	Výsledky	92
4.8.4	Závěry z hydrotermálního ošetřování.....	93
4.9	Deskové vzorky	94
4.9.1	Teplotní zatěžování	94
4.9.2	Ohybová zkouška	95
4.9.3	Dílčí výsledky	96
4.9.3.1	Objemová hmotnost	96
4.9.3.2	Pevnost v tahu za ohybu.....	97
4.9.3.3	Duktilita	100
4.9.3.4	Makroskopické změny	100
4.9.4	Dílčí závěry a diskuze	102
Kapitola 5		
	Závěr.....	103
Kapitola 6		
	Možnosti dalšího směřování	106
	Seznam použitých symbolů, zkratk a veličin	114
	Seznam tabulek	119
	Přílohy.....	120

KAPITOLA 1

ÚVOD, MOTIVACE A VÝCHODISKA

Předložená disertační práce se svým tématem a zaměřením věnuje problematice vlákniny vyztužených kompozitů určených pro prostředí vysokých teplot. Popsaná problematika byla dlouhodobě řešena v Experimentálním centru Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Výzkum dané problematiky byl podpořen projektem základního výzkumu Grantové agentury ČR – projekt GAČR P104/12/0971 *Vláknové kompozity na bázi cementu pro vysokoteplotní aplikace*, řešeného v letech 2012 až 2017. Období řešení výše uvedeného grantového projektu a provádění laboratorních prací pro potřeby disertační práce probíhalo ve stejném časovém období. Tato disertační práce se zabývá experimentální analýzou vlivu teplotního zatížení různé úrovně na vybrané vlastnosti vlákniny vyztužených kompozitů s přírodním kamenivem a hlinitanovým cementem.

Oblast materiálů vhodných do prostředí vysokých teplot zahrnuje široké spektrum možných řešení dle maximální teploty použití, druhu pojivového a plnivového systému, způsobu přípravy, oblasti použití atp. Záruvzdorné materiály lze klasifikovat podle širokého spektra parametrů, např. na kompozity na bázi cementu a keramické výrobky. Kompozitní materiály představují základnu moderního materiálového inženýrství, neboť ze své podstaty využívají tzv. synergický efekt, jehož princip spočívá ve spojení dvou a více vstupních materiálů, jehož výsledkem je nový materiál s vyššími užitnými vlastnostmi, než mají samostatné vstupní materiály. Beton, jakožto nejrozšířenější stavební materiál, můžeme rovněž klasifikovat jako kompozitní materiál. V souvislosti s rozšířením materiálů vysokých užitných a mechanických parametrů s výbornou trvanlivostí hovoříme o vysokohodnotných cementových kompozitech. Spojení cementových kompozitů s vláknou se nabízí rovněž pro kompozity speciálně určené do provozů a prostředí, kde lze očekávat vysoké teplotní zatížení. Celá desetiletí byla s výhodou využívána kombinace asbestových vláken s dalšími komponenty. Z důvodu zákazu užívání asbestu je nutné hledat materiálovou náhradu vhodnou pro výrobu vláken aplikovatelných v kompozitech určených do prostředí s rizikem výskytu teplotního zatížení. Nejčastěji se jedná o materiály vysokých užitných vlastností, jako jsou uhlík, čedič, sklo, aramid, keramika. Při návrhu a přípravě vláknového kompozitu na bázi cementu pro vysokoteplotní aplikace musíme uvážit tři hlavní aspekty – teplotní odolnost

cementové matrice a plniva, odolnost samotných vláken, vzájemnou kompatibilitu vláken a matrice ve všech teplotních režimech.

Výhradním pojivem s hydraulickou vazbou pro kompozity aplikovatelné do prostředí vysokých teplot je hlinitanový cement. Výroba tohoto pojiva je zatížena velkými nároky na spotřebu energie, což se odráží v ekonomické a ekologické náročnosti výsledného produktu. Aktuálním tématem je snižování environmentální náročnosti nahrazením části pojiva materiálem s menším energetickým a ekologickým dopadem. Tento trend lze identifikovat rovněž v případě žáruvzdorných betonů, kde lze s úspěchem použít kombinaci hlinitanového cementu a metakaolinu [1] případně mikrosiliky [2]. Stabilita hydratačních produktů hlinitanového cementu, a tím i celková životnost může být pozitivně ovlivněna přítomností pucolánově aktivních materiálů.

Při řešení problematiky dané tématem disertační práce vycházíme z určitých předpokladů, které souvisejí s touto problematikou, předpokládanými použitými materiály a jejich vlastnostmi. Tyto předpoklady byly v průběhu řešení práce ověřovány a testovány.

Stanovená východiska formulují následující body:

- Přírodní drcené čedičové kamenivo je schopno fungovat jako plnohodnotné pojivo v cementovém kompozitu za předpokladu uvážení jeho teplotního limitu.
- Omezení pro čedičové kamenivo se může projevit v případě opakovaného teplotního zatěžování v úrovni nad 800 °C. Běžně probíhá experimentální vyšetřování vlivu účinku vysokých teplot na cementové kompozity za použití jednoho teplotního cyklu.
- Metakaolin či cihelný prach může sloužit jako vhodný substituent hlinitanového cementu a plnohodnotná složka cementového kompozitu aplikovatelného do prostředí s předpokladem výskytu teplotního zatížení.
- Čedičová a keramická vlákna představují vhodné materiálové řešení pro zlepšení mechanických parametrů cementového kompozitu
- Ošetřením kompozitu s hlinitanovým cementem v hydrotermálních podmínkách může být dosaženo vyšších reziduálních pevností a větší odolnosti vůči účinku vysokých teplot.
- Laboratorní testování na menších vzorcích nemusí plně reflektovat reálné podmínky praktických aplikací v prostředí vysokých teplot, které lépe popíše např. deskový vzorek o větší ploše.

1.1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Před začátkem vlastního řešení problematiky spojené s disertační prací, v souladu s grantovým projektem GAČR P104/12/0791, byly vytyčeny základní cíle a směřování experimentálního programu, včetně hlavních použitých komponent. Vytyčení cílů proběhlo v souladu s východiskem tak, aby splněním cílů bylo možné úvodní předpoklady ověřit či vyvrátit. V průběhu vlastního zpracování experimentální části na základě dosažených dílčích výsledků byly některé cíle blíže specifikovány, mírně modifikovány a prohloubeny. Dále uvádím konkrétní cíle disertační práce, definované v následujících bodech:

- Vytvořit přehled dosavadních poznatků z oblasti žáruvzdorných materiálů a interakce cementových kompozitů s prostředím vysokých teplot. Provést rešerši literárních

zdrojů věnujících se žáruvzdorným materiálům se zvláštním zaměřením na hlinitanový cement. Součástí literární rešerše bude rovněž studium problematiky hydrotermálních podmínek ošetřování na výsledné vlastnosti a charakteristiky cementových kompozitů.

- Zpracovat dílčí experiment zaměřený na studium vlastností past z hlinitanového cementu a jejich schopnost vzdorovat účinku vysokých teplot, kvantifikovaných na základě mechanických parametrů.
- Využít základní složení žáruvzdorného cementového kompozitu s přírodním čedičovým kamenivem (definován v rámci řešení P104/12/0791) a rozšířit jej z hlediska možnosti využití jemnozrnných substituentů hlinitanového cementu v rozdílném množství. Dále provést analýzu vlivu množství a materiálu použitých vláken v daném kompozitu z hlediska jeho využití v prostředí vysokých teplot.
- Na základě evaluace převážně mechanických charakteristik (residuálních pevností) identifikovat optimální složení cementového kompozitu z hlediska typu a množství vláken a rovněž vzájemný poměr hlinitanového cementu a jemnozrnné příměsi. Na sníženém počtu směsí vybraných na základě výsledků předchozích experimentů provést detailnější analýzu vlivu účinku vysokých teplot na základní a mechanické charakteristiky.
- Ověřit možnost aplikovat vyšetřovaný cementový kompozit v prostředí simulující reálné podmínky aplikace žáruvzdorných kompozitů (opakované teplotní zatížení) a zároveň provést experimentální program zaměřený na deskové vzorky větších rozměrů.
- Experimentálně kvantifikovat účinek hydrotermálních podmínek ošetřování na residuální mechanické vlastnosti.
- Provést doplňkovou analýzu pórové struktury kompozitu a vlivu podmínek vysokých teplot na strukturu použitých vláken za pomoci elektronové mikroskopie.

1.2 OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE

Předkládaná disertační práce se skládá z úvodních standardizovaných stran, obsahu, abstraktu v českém a anglickém jazyce, šesti kapitol, seznamu použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek, seznamu použité literatury a příloh k disertační práci. První kapitola obsahuje úvod, motivaci k řešení dané problematiky, obsah a především definuje cíle disertační práce. Druhá kapitola shrnuje dosavadní stav poznání (*state-of-the-art*) v oblasti žáruvzdorných materiálů se zaměřením na hlinitanový cement, reakci obecných cementových kompozitů na účinek vysokých teplot, vlákna vhodná pro vyztužení kompozitů do vysokých teplot a rovněž přináší informace z oblasti hydrotermálního ošetřování cementových kompozitů. Druhá kapitola má formu literární rešerše dostupných odborných zdrojů, převážně zahraničních časopisů. Metodologické postupy, vyšetřované parametry a rovněž použité materiály popisuje kapitola třetí. Hlavní částí disertační práce je kapitola čtvrtá, obsahující shrnutí dosažených parametrů, včetně residuálních charakteristik po teplotním zatížení a snímků použitých čedičových vláken z elektronového mikroskopu. Součástí čtvrté kapitoly jsou taktéž dílčí shrnutí a závěry vyvozené z jednotlivých částí experimentálního programu. Pátá kapitola pak obsahuje celkový závěr disertační práce, shrnutí dosažených výsledků. Závěrečná šestá kapitola zmiňuje oblasti možného zaměření dalších výzkumných aktivit.

Tematicky lze disertační práci rozdělit do dvou hlavních celků. První je převážně teoretická část zahrnující literární rešerši dané problematiky, mimo jiné interakce cementových kompozitů, teplotního zatížení, a dále metodologický popis provedených experimentálních metod a zkoušek. Tematicky druhá část je věnována experimentálnímu programu, jeho popisu a vyhodnocení včetně diskuze výsledků a uvedení z nich plynoucích závěrů.

Seznam použitých zdrojů, tabulek, obrázků a symbolů navazuje na pátou kapitolu. Součástí disertační práce jsou rovněž přílohy, jejíž hlavní část obsahuje konkrétní hodnoty základních a mechanických parametrů, které nebyly v konkrétní číselné formě prezentovány v rámci textu disertace.

KAPITOLA 2

SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Žáruvzdorné materiály můžeme klasifikovat na základě několika hledisek zohledňujících způsob výroby, druh vazby zajišťující soudržnost, rozsah aplikovatelných teplot, použité materiály, mechanickou odolnost, strukturu a typ použitých komponent, pórovitost, chemické složení atp. Norma ASTM C71 [3] definuje žáruvzdorné materiály jako *nekovové materiály vyznačující se chemickými a fyzikálními vlastnostmi, které umožňují jejich aplikaci pro samostatné prvky či komponenty systému vystaveného teplotám nad 538 °C*. Obecně pojem žáruvzdorné materiály (angl. *refractories*) chápeme jako vysokohodnotné kompozity vyvinuté pro průmyslové, technologické, ochranné či jiné speciální účely, vystavené během svého životního cyklu účinkům zvýšených teplot [4].

2.1 ŽÁRUVZDORNÉ MATERIÁLY

Základní rozdělení žáruvzdorných materiálů podle technologie výroby je na tvarované (angl. *shaped*) a netvarované (angl. *unshaped*). Pojem „tvarované“ lze do stavební terminologie popsat jako prefabrikované. Jedná se o výrobky, které charakterizuje předem definovaný tvar ve formě stavebních dílců ať již standardizovaných rozměrů, dílčího a doplňkového sortimentu, či speciálních prvků. Základním a snadno představitelným reprezentantem tvarovaných žáruvzdorných materiálů je cihelný prvek, který je využitelný pro vyzdívku např. pecí. Využívaný rozměr 230×114×64 resp. 76 mm [5] je menší než standardní formát plně pálené cihly a blíží se metrickému formátu cihel (rozměr 240×115×72 mm). Do této skupiny můžeme zařadit rovněž různé tvarovky, speciální konstrukční prvky (klenáky) atp. Vzhledem k danému rozměru tvarovaných žárobetonů ve formě cihly existuje tzv. cihelný ekvivalent (angl. *brick equivalent*) [6] přibližně vyjadřující množství cihel potřebných k provedení vyzdívky např. pece a slouží jako její charakteristika. Opačným typem jsou materiály netvarované (angl. *unshaped*), někdy označované jako monolitické. Dle ISO 1927 a DIN EN 1402-1 jsou definovány *směsi, které sestávají z přísad a jednoho nebo více pojiv, připravené k okamžitému použití buď ve formě čerstvé směsi, nebo ve formě suché směsi připravené k použití po přidání potřebných tekutých složek, splňující žáruvzdorné charakteristiky dle ISO R 836. Tyto směsi jsou buď hutné, nebo izolační. Izolační směsi charakterizuje celková porozita vyšší než 45 %* [8, 9].

V závislosti na chemickém složení, které určuje hodnoty pH, můžeme rozdělit žáruvzdorné materiály do třech skupin. Často se následující rozdělení uvádí v závislosti na reakci se struskou [9]

- kyselé (křemičité či křemičito-hlinité, řadíme sem rovněž hlinitanové cementy)
- zásadité (s obsahem hořčíku, chromu, využitelné např. v metalurgii)
- neutrální (grafit, chromit, karbidy zinku a křemíku) [10, 11, 12]

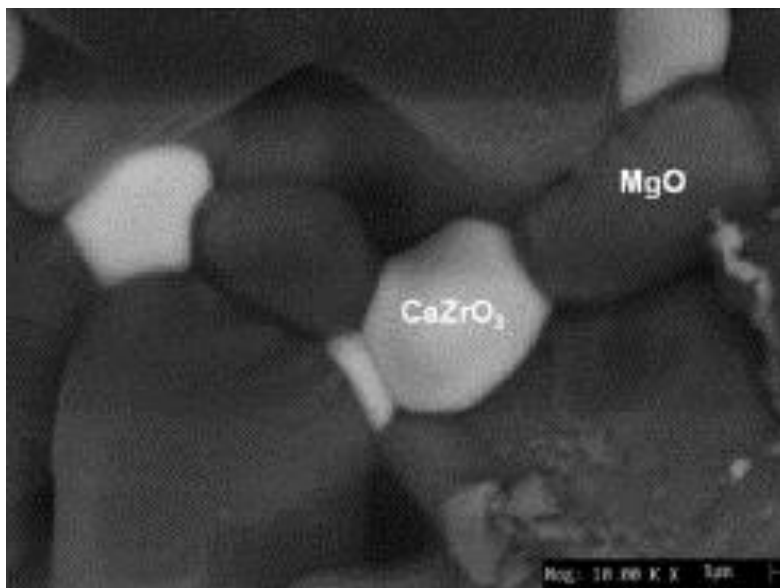
Žáruvzdorné materiály se skládají z pojivové složky a plniva (ostřiva). Soudržnost mezi plnivem a pojivem zajišťují tři základní typy vazeb, níže popsané. Typ vazby závisí na složení žáruvzdorného materiálu, předpokládané maximální teplotě použití a na technologii výroby.

2.1.1.1 Hydraulická vazba

Hydraulická vazba v žarobetonech vzniká hydratací hlinitanového hydraulického pojiva, v tomto případě hlinitanového cementu. Výsledné parametry, včetně maximální použitelné teploty, determinuje celkový obsah Al_2O_3 . Při vhodně použitém typu plniva a mikroplniva (např. korundu) je možné očekávat maximální aplikační teplotu až $1800\text{ }^\circ\text{C}$ [13]. Bližší informace ohledně vzniku hydraulické vazby, vlivu okrajových podmínek a mineralogických změn vlivem účinku zvýšených teplot budou popsány v kapitole 2.2.2.7. Charakteristickou vlastností hydraulické vazby je, že vzniká při běžných teplotních podmínkách, tj. není třeba k jejímu vzniku tzv. prvotní výpal.

2.1.1.2 Keramická vazba

Keramická vazba vzniká slinutím pojiva a plniva při prvním teplotním zatížení (obvykle nad $1000\text{ }^\circ\text{C}$) [14, 15], z čehož je zřejmé, že finálních mechanických vlastností je dosaženo až po tzv. prvotním výpalu. Proces slinování vedoucí ke vzniku keramické vazby probíhá při teplotách nižších, než je bod tání jednotlivých složek, a v jeho průběhu se nevyskytuje tekutá fáze. Keramická vazba často nahrazuje původně vzniklou vazbu chemickou, a to transformací teplotních změn a reakcí mezi pojivem a jemnozrnným plnivem, případně rovněž vazbu hydraulickou, a to její dehydratací a následným slinutím. Pro omezení tavení jednotlivých složek a řádný průběh slinutí musí být zvoleno vhodné mikroplnivo. Obvyklá teplota slinutí, a tedy interval vzniku keramické vazby, leží v rozmezí cca $1000\text{ }^\circ\text{C}$ až $1400\text{ }^\circ\text{C}$ [16]. Keramická vazba se vyznačuje vysokou odolností vůči účinkům prostředí vysokých teplot, a proto lze kompozity na její bázi aplikovat v nejnáročnějších průmyslových podmínkách (např. rotační pece na výrobu cementu, metalurgické provozy atp.). Pro zvýšení odolnosti vůči rychlým změnám teploty (např. šokovému ochlazení), chemické korozi a rovněž pro snížení teplotní vodivosti se do systému přidávají vybrané oxidy kovů – např. SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgAl_2O_4 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , CaZrO_3 , FeAl_2O_4 [17]. Tyto oxidy též zlepšují samotný proces slinování reakcí s hlavním oxidem tvořícím základ příslušného kompozitu (např. MgO) [17]. Snímek keramické vazby pořízený pomocí elektronového mikroskopu ilustruje **Obrázek 1**.



Obrázek 1 Snímek keramické vazby mezi MgO a $CaZrO_3$ z elektronového mikroskopu [17].

2.1.1.3 Chemická vazba

Chemická vazba má podobu anorganickou, anorganicko-organickou či organickou. K jejímu vytvrzování dochází na základě chemické reakce při pokojové teplotě, případně při výpalu před vznikem keramické vazby [17]. Chemickou vazbou se vyznačují např. $MgO-Cr_2O_3$ materiály [18]. Chemická vazba může být realizována na základě sulfátů, fosfátů, roztoku koloidního křemíku, vodního skla, Solerova cementu [19].

2.2 ŽÁROBETONY

Samostatnou podskupinou materiálů využívaných v prostředí vysokých teplot jsou materiály s hydraulickou vazbou, které lze souhrnně pojmenovat jako žárobetony. Jistou podskupinou využitelnou pro teploty do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ je tzv. ohnivzdorný beton. Izolační schopnosti a schopnost vzdorovat účinku teplotního zatížení souvisí s celkovou pórovitostí, kdy rozeznáváme následující tři kategorie:

- hutné (pórovitost 10 % – 16 %)
- obyčejné (20 % – 30 %)
- lehké (nad 30 %).

2.2.1.1 Dle obsahu cementu

Základní rozdělení žáruvzdorných betonů (žárobetonů) souvisí s celkovým obsahem hlinitanového cementu. Následující schéma ilustruje klasifikaci a rozdělení monolitických (netvarovaných) žárobetonů dle ENV 1402-1 [18]:



Pro výše uvedené netvarované žáruvzdorné materiály (v tomto případě lze hovořit o monolitických žárobetonech) se nabízejí obdobné možnosti ukládání a hutnění čerstvé směsi, jako známe z běžné betonářské praxe týkající se konstrukčních betonů. Možné jsou tedy klasické metody vibrování, doplněné o možnost použití samozhutnitelných směsí, případně stříkaných žárobetonů.

2.2.2 Hlinitanový cement

Z chemického hlediska lze v hlinitanových cementech identifikovat dva základní oxidy, a to Al_2O_3 a CaO . Hlinitanovým cementem se rozumí rychle tvrdnoucí hydraulické pojivo vyznačující se vysokým vývinem hydratačního tepla, rychlým nárůstem pevnosti, vysokou odolností vůči žáru a negativním účinkům síranového prostředí. Právě rychlý nárůst počátečních pevností ovlivnil jeho poměrně rozsáhlé využití především v období po druhé světové válce, kdy vyvstala potřeba rychlé obnovy válkou zničené infrastruktury, bytového fondu a rozvoj stavebnictví všeobecně. Hlinitanový cement našel své využití v tehdejší Československu. Rozsáhlé aplikace je možné najít i v dalších zemích, např. ve Velké Británii. Teprve série havárií vedla k hlubšímu zájmu o problematiku dlouhodobého chování betonů s hlinitanovým cementem. Předmětem výzkumu byla především dlouhodobá stabilita hydratačních produktů. Také na území tehdejší ČSSR došlo k havárii nosné konstrukce výrobní haly z hlinitanového cementu, která si vyžádala oběti na životech. Zřícená konstrukce byla vybudována v roce 1952 a k jejímu zřícení došlo po 32 letech užívání stavby. Následkem zřícení zmíněného halového objektu podniku MESIT v Uherském Hradišti v roce 1984 bylo o rok později zakázáno užívání hlinitanového cementu pro výrobu betonů určených pro nosné konstrukce na území ČSSR. Právním základem pro tento zákaz bylo Usnesení vlády ČSSR č. 163/85. Zároveň proběhla rozsáhlá kontrola staveb vzniklých v období 1930 až 1960, u kterých panovalo důvodné podezření, že při jejich výrobě mohlo být použito hlinitanového cementu.

I přes zákaz použití hlinitanového cementu do nosných konstrukcí stále nachází své uplatnění především pro vysokou odolnost vůči účinku vysokých teplot. Povahu hydratačních fází hlinitanového cementu do značné míry určuje složení základních minerálů a jejich poměr. Proto při zvyšování poměru CaO a Al_2O_3 v hlinitanovém cementu dochází ke zvyšování zásaditosti a rovněž rychlosti interakce s vodou. Ve stejný moment však klesají žáruvzdorné charakteristiky a maximální teplota, do níž lze uvedený cement použít [21]. Obecně lze říci, že kvalitu cementu a s ní spojenou maximální teplotu, do které lze daný cement aplikovat,

určuje obsah Al_2O_3 . Základní rozdělení hlinitanových cementů, jak uvádí **Tabulka 1**, lze uspořádat právě dle obsahu oxidu hlinitého.

Tabulka 1 Rozdělení hlinitanových cementů dle obsahu oxidu hlinitého.

Hlavní třídy hlinitanových cementů a jejich typické chemické složení (%)						
Typ	Třída	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	SiO_2	Barva
CAC 40	nízkohlinitanový	37 – 42	36 – 40	11 – 17	3 – 8	tmavošedá
CAC 50	hlinitanový	49 – 52	39 – 42	1 – 0,5	5 – 8	světlešedá
CAC 70 – 80	vysokohlinitanový	68 – 80	17 – 20	0 – 0,5	0 – 0,5	bílá

2.2.2.1 Výroba hlinitanového cementu

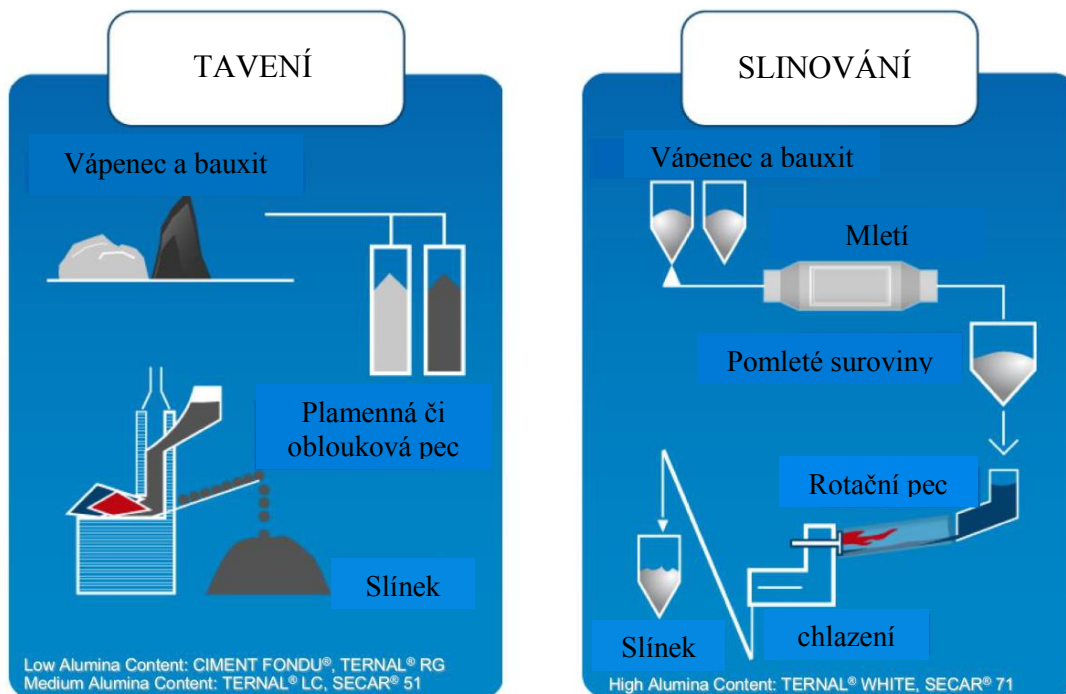
První hlinitanový cement byl vyroben ve Francii již v roce 1865. Po dalších 23 letech proběhlo jeho patentování v Anglii [22]. Počátek komerční výroby hlinitanového cementu se datuje v roce 1908, kdy byl podán patent Julese Bieda, výzkumného ředitele společnosti Pavin de Lafarge, na výrobu Ciment Fondu®. Následná průmyslová produkce hlinitanového cementu započala v roce 1913. Hydraulické vlastnosti kalcium aluminátu byly známé již od poloviny 19. století. Původní cement z počátku 20. století se vyráběl tavením vápence a bauxitu s nízkým obsahem křemíku v kupolové peci.

V Československu probíhala výroba hlinitanového cementu od roku 1933 [23, 24] v cementárně v Ladcích (okres Il'ava na západním Slovensku), výsledný produkt nesl název Bauximent. Širšímu rozšíření tohoto cementu bránila na tehdejší poměry vysoká cena.

Existují dva základní přístupy k výrobě hlinitanového cementu – slinování a tavení. Počátky jeho komerční výroby ve Francii probíhaly na principu tavení výchozích složek (bauxit a vápence) v kupolových pecích. Tímto způsobem probíhala i výroba již dříve zmíněného *ciment fondu*. Proces tavení je velmi energeticky náročný, což lze konstatovat o výrobě hlinitanového cementu obecně, proto se využívá spíše v zemích, kde jsou ceny elektrické energie na nižší hladině [25]. Proces slinování vstupních materiálů v rotačních pecích je považován za ověřený způsob produkce cementů různých kvalit a čistoty. Je využíván rovněž pro výrobu vysoce kvalitních hlinitanových cementů vysoké čistoty s obsahem oxidu hlinitého přes 70 % [26]. Tavení rozdrcených surovin probíhá v peci (např. elektrické či plamenné) při 1600 °C. Proces slinování je citlivý na obsah Fe_2O_3 a při jeho vyšších koncentracích je již obtížně proveditelný. Proto je tato metoda využívána pro vysocehlinitanové cementy vyšších kvalit [26]. Pro dosažení vysoké kvality hlinitanových cementů je nutné používat vstupní suroviny co nejvyšší možné čistoty s nízkým obsahem oxidů železa, titanu či křemíku [27]. Pro výrobu cementů s vysokým obsahem oxidu hlinitého (více než 70 % celkové hmotnosti), které lze použít do prostředí s teplotami přes 1000 °C, se používají vstupní suroviny nejvyšší kvality a často uměle vytvořené. Příkladem může být využití uměle vyrobeného bauxitu maximální možné čistoty, díky kterému dosahuje výsledný cement vysokých užitných vlastností. Výpal a následné chladnutí opět determinuje výsledné vlastnosti – taveninu či slínek je třeba pomalu chladit, aby mohlo proběhnout důsledné vykrytalizování hlinitanů [28].

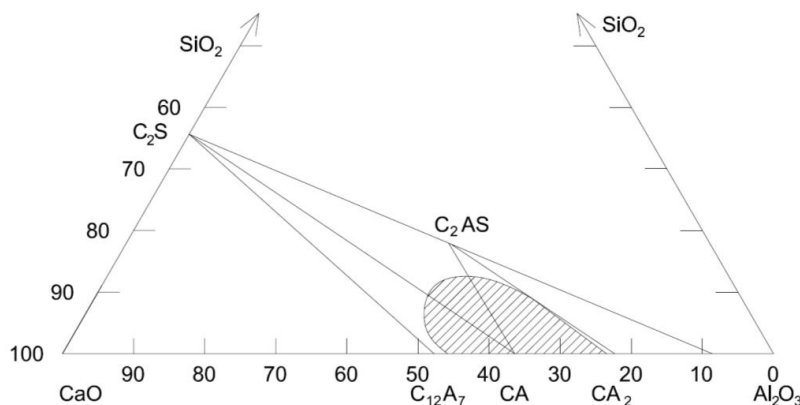
Při využití technologie tavení dochází ke smíchání rozdrceného vápence a bauxitu, mleto odděleně. Tato směs je tavena v plamenné či obloukové peci při teplotě 1600 °C. Výsledného produktu je dosaženo mletím slínku na požadovanou jemnost. Při využití redukčního slinování v rotační peci dojde nejprve k pomletí vápence a bauxitu, obvykle uměle

vytvořeného pro dosažení kontrolované kvality, jako jedné směsi. Následné slinování a dosažení slínku je velmi rychlé. Po výpalu v rotační peci při 1250 °C – 1350 °C následuje postupné chlazení slínku tak, aby vznikly kvalitní krystaly oxidu hlinitého. Výsledný produkt opět vzniká mletím slínku na požadovanou jemnost. Oba hlavní procesy výroby hlinitanového cementu (tavení i slinování) jsou schematicky naznačeny na **Obrázku 2**.

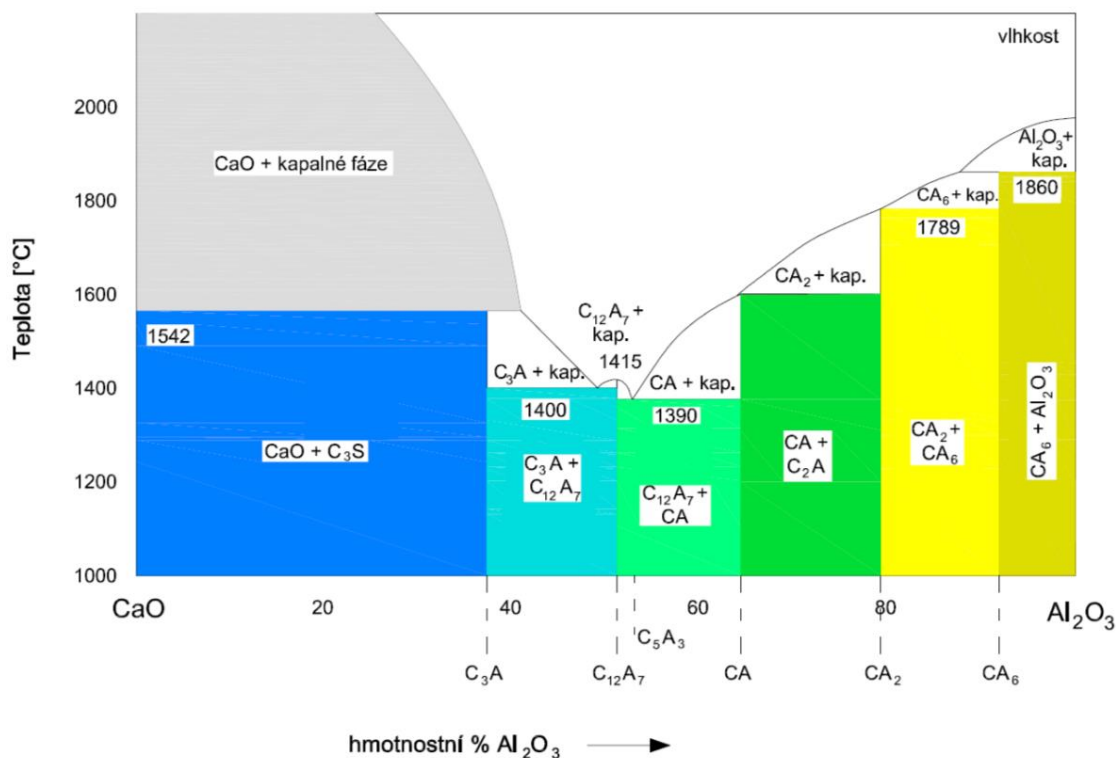


Obrázek 2 Schéma dvou používaných způsobů výroby hlinitanového cementu [28].

Složky vápence a bauxitu reagují do formy několika cementových fází, převážně však kalcium aluminátu (CA) a dikalcium aluminátu (CA_2). Vzájemný poměr těchto složek ovlivňuje chemická čistota vstupních surovin, především obsah SiO_2 , TiO_2 a Fe_2O_3 [26]. Vstupní suroviny by měly obsahovat co nejmenší množství SiO_2 pro potlačení vzniku gehlenitu (C_2AS) [30]. Oblast výskytu hlinitanového cementu v ternárním systému $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ dle Taylora [31] graficky znázorňuje **Obrázek 3**. V binárním systému CaO a Al_2O_3 , publikovaném poprvé Rankinem a Wrightem, jsou vyznačeny hlavní sloučeniny hlinitanu vápenatého [32]. Z **Obrázku 4** vyplývá již výše uvedený fakt, že s rostoucím obsahem oxidu hlinitého v cementu roste jeho žáruvzdornost (vyšší body tání fází v pravé části diagramu).



Obrázek 3 Oblast výskytu hlinitanového cementu v ternárním diagramu C-A-S [31].



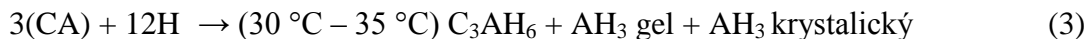
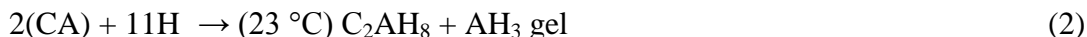
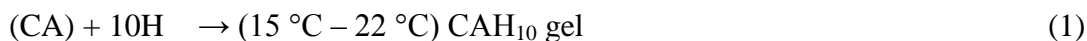
Obrázek 4 Fázové složení hlinitanových cementů [33].

2.2.2.2 Hydratační teplo

Hlinitanový cement rovněž charakterizuje rychlý vývoj hydratačního tepla v rozmezí 460 – 500 J/g (případně 545 – 585 J/g [34]). Obdobných hodnot dosahují i rychle tuhnutí portlandské cementy. Typické pro hlinitanové cementy je právě rychlý vývoj hydratačního tepla, kdy během prvních 24 hodin od kontaktu vody s cementem dojde k uvolnění 70 – 90 % celkového hydratačního tepla, hodnoty uvažujeme při teplotě okolního prostředí 20 °C. Portlandské cementy ve stejném sledovaném období vyprodukují cca 25 – 50 % celkového hydratačního tepla. Vysoký vývin hydratačního tepla koresponduje s rychlým nárůstem počátečních pevností [27]. V porovnání s ostatními reakcemi dochází během prvních 10 hodin k uvolnění převážné části hydratačního tepla vlivem CA₂. Příspěvek kalcium aluminátu k vývoji pevnosti nemůže být zanedbán ani při využití pro žáruvzdorné aplikace a související delší doba ošetřování je přínosem zejména pro výrobu rozsáhlejších prefabrikovaných prvků [34].

2.2.2.3 Hydratace hlinitanových cementů

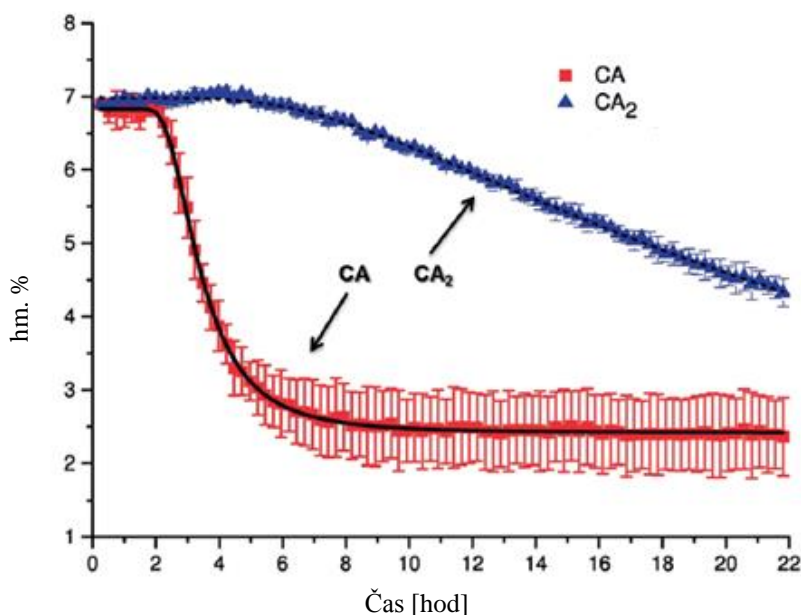
Proces a princip hydratace hlinitanového cementu, jakož i jeho výsledné vlastnosti se zásadně odlišují od hydratace portlandského cementu. Množstevní zastoupení jednotlivých minerálů ovlivňuje hydrataci hlinitanových cementů – reaktivnost cementu, vývin hydratačního tepla, rychlost hydratace, její průběh a vlastnosti výsledného produktu. Základní hydraulické minerály hlinitanového cementu jsou kalcium aluminát (CA) a dikalcium aluminát (CA₂). Dále je možné identifikovat i C₄AF (brownminilerit), C₂AS (gehlenit), C₂F a CT [26, 35]. Kromě zmíněných hydratačních fází lze identifikovat další nezhydratované minerály. Použijeme-li klasickou cementářskou notaci, můžeme hydrataci hlinitanového cementu popsat následujícími rovnicemi (1), (2) a (3):



kde C \equiv CaO; H \equiv H₂O; A \equiv Al₂O₃)

2.2.2.4 Rychlost hydratace

Jedním z důvodů využití hlinitanového cementu byla vysoká rychlost nárůstu počátečních pevností. CA se vyznačuje pomalým procesem tuhnutí a následně dochází k rychlému tvrdnutí. CA₂ určuje finální pevnosti po proběhnutí hydratace cementu, avšak rychlost hydratace této fáze je nejnižší. Rychlé tuhnutí a vysoká reaktivita charakterizuje C₁₂A₇. Vzájemný poměr třech hlavních výše uvedených fází určují použité vstupní suroviny a způsob výroby. Dle poměru jednotlivých fází lze hodnotit rovněž kvalitu jednotlivých hlinitanových cementů a maximální teplotu jejich aplikace. Z důvodu vysoké reaktivnosti C₁₂A₇ je snaha výrobců hlinitanového cementu omezovat jeho množství. K jeho reakci a následnému tuhnutí dochází téměř současně s ukončením přidávání záměsové vody. Na druhou stranu malý obsah C₁₂A₇ akceleruje hydrataci CA [36]. Vzájemný poměr CaO:Al₂O₃ určuje reaktivitu cementu a ovlivňuje odolnost vůči vysokým teplotám. Tento fakt potvrzuje i přehled vybraných komerčně dostupných hlinitanových cementů, uvedený v **Tabulce 3**. U některých cementů s vysokým obsahem Al₂O₃ a poměrově k němu nižším obsahem CaO uvádí výrobce garantovanou pevnost v tlaku po 24 hodinách nižší než v případě cementů s nižším obsahem Al₂O₃. Dle studie provedené Cardosem [37] dochází v prvních 50 – 70 hodinách ošetřování (po kontaktu cementu s vodou) k hydrataci CA, kterou urychluje C₁₂A₇. První reakce hlinitanových cementů ovlivňuje hydrataci CA; hydrataci CA₂ začíná v okamžiku kulminace hydratace CA [34], kterou lze nazvat akcelerační fází [38]. Rychlost reakce CA a CA₂ popisuje rovněž **Obrázek 5**, na kterém je znázorněn průběh hydratace cementové pasty o vodním součiniteli 0,45 při teplotě 23 °C.



Obrázek 5 Hydratace jednotlivých fází CA a CA₂ [34].

Hydratace CA je doprovázena vznikem amorfních AH_x a C_2AH_8 a $C_2AH_{7,5}$. V **Tabulce 2** jsou uvedeny hlavní i vedlejší složky hlinitanových cementů, včetně rychlosti jejich tuhnutí a zastoupení.

Tabulka 2 Rychlost tuhnutí jednotlivých složek hlinitanového cementu.

Složka	Rychlost tuhnutí	Obsah
$C_{12}A_7$	Velmi rychlé	převaha
CA	Střední	minoritní
CA_2, C_4AF	Velmi pomalé	malý
$CA_6, \alpha-Al_2O_3$	Minimální či žádné	marginální
C_2AS, CT	Minimální či žádné	marginální
C_2F	Minimální či žádné	marginální

2.2.2.5 Konverze

Důvody, které vedly k zákazu použití hlinitanového cementu v konstrukčních betonech pro nosné části budov, spočívají ve tvorbě hydrátů nestabilních forem. Nestabilní CAH_{10} vzniká při nedostatečném ošetřování, kdy teplota při tuhnutí a tvrdnutí překročí $30\text{ }^\circ\text{C}$ (některé zdroje uvádí $35\text{ }^\circ\text{C}$ [39, 40], jiné zdroje až $50\text{ }^\circ\text{C}$ [41]). Následný děj po vzniku nestabilních hydrátů se nazývá konverze, kdy dochází k přeměně původně nestabilních hydrátů na stabilní formy. Proces konverze popisují následující rovnice (4), (5), opět za využití cementářské notace:



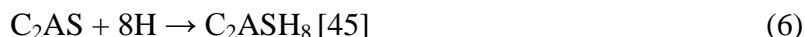
Jádro problému a příslušných konsekvencí spojených s konverzí (rekrytalizací) nestabilních CAH_{10} a C_2AH_8 na stabilní kubickou formu C_3AH_6 spočívá ve změně objemu. Stabilní kubickou formu charakterizuje nižší objem. Při rekrytalizaci tedy dojde k nárůstu pórovitosti vlivem nárůstu objemu a s tím související narušení integrity vnitřní struktury, kdy tento jev provází významný pokles pevnosti. Konverzi a s ní spojený pokles mechanických vlastností obvykle signalizuje změna barvy pojiva do červených odstínů [42]. Kromě teploty ošetřování hraje svoji roli rovněž vodní součinitel, kdy při jeho nárůstu (tj. zvýšení množství vody v betonu vyrobeném z hlinitanového cementu) roste riziko konverze [43].

Kromě obvykle uváděného C_2AH_8 při teplotě mezi $25\text{ }^\circ\text{C}$ a $30\text{ }^\circ\text{C}$ může rovněž vznikat C_4AH_{19} , a to v závislosti na koncentraci $Al(OH)_4^-$ a Ca^{2+} [44].

Zatímco hydratační reakce ($C_{12}A_7$, CA, CA_2) primárně determinuje čas (rychlost a reaktivnost jednotlivých fází je uvedena výše), problematiku konverze determinují okrajové podmínky, konkrétně teplota.

2.2.2.6 Hydratace hlinitanových cementů v prostředí dalších aktivních materiálů

Riziko konverze a s ním spojenou ztrátu pevnosti hlinitanových cementů a betonů z hlinitanových cementů vyrobených lze kromě vhodně zvoleného a striktně dodržенého způsobu ošetřování čerstvé směsi snížit i přidáním dalších hydraulicky aktivních materiálů účastnících se procesu hydratace. Jedná se např. o popílek, mikrosiliku, vysokopecní strusku či obecně materiály vyznačující se pucolánovou aktivitou. Účastní-li se hydratace hlinitanového cementu další minerální příměsi, vznikají nové hydratační produkty – např. C_2ASH_8 . Formování stratlingitu (6) v amorfní fázi teoreticky probíhá v systému $CaO-SiO_2-Al_2O_3-H_2O$ dle následující rovnice:



Částečnou náhradou hlinitanového cementu pucolánovými materiály lze redukovat ztrátu pevnosti jako následek případné konverze hexagonální formy hydrátů (CAH_{10} a C_2AH_8) na kubickou stabilní formu hydrátů (C_3AH_6) [46]. Stratlingit (C_2ASH_8) vzniká při hydrataci hlinitanového cementu s příměsí vysokopecní strusky. Cement tohoto typu byl produkován pod názvem BRECEM [47]. Calcium Sulphoaluminate cements (CSA) hydratují převážně ve formě AF a v závislosti na fázi hydratace obvykle za přítomnosti andyditu (CS) nebo sádry (CSH_2) [48]. Pro zlepšení vlastností pojivového systému založeného na hlinitanovém cementu se nabízí rovněž možnost použít portlandské cementy jako částečnou náhradu cementu hlinitanového.

2.2.2.7 Změny v hlinitanových cementech vlivem vysokých teplot

Přestože o hlinitanovém cementu hovoříme jako o pojivu vhodném pro přípravu žáruvzdorných materiálů, dochází i v jeho případě k řadě procesů způsobených vlivem vysokých teplot. Pod pojmem „procesy“ si lze představit chemické, fyzikální či fyzikálně-chemické jevy spojené s kvalitativními změnami materiálových charakteristik. V souvislosti s účinkem teploty hovoříme nejdříve o procesu vysoušení, kdy dochází k uvolnění volné a části fyzikálně vázané vody, a to při teplotách do 110 °C. Jedná se převážně o zbytky technologické vody a dále vody obsažené v pórové struktuře v rámci vyrovnání vlhkosti s okolním prostředím. Rychlost evaporace ovlivňuje stav pórů, jejich velikost a provázanost pórové struktury. V rámci teploty do 110 °C dochází rovněž ke ztrátě vody vázané v amorfních AH_3 gelech. V rozmezí 100 °C až 130 °C probíhá dekompozice hydratačních fází CAH_{10} ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$) [49]. V případě studovaného cementu Secar®71 probíhá dehydratace CAH_{10} při teplotě 120 °C [50]. Podle výsledků XRD provedených Rambem et al. [51] se metastabilní hydráty CAH_{10} ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$) a C_3AH_8 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$) nevyskytují již po účinku 200 °C. Dle Taylora [49] dochází k dehydrataci C_2AH_6 v teplotách 170 – 195 °C. V následujícím rozmezí 200 °C až 400 °C dochází dle Ramba [51] k dehydrataci zbývajících hydrátů AH_3 a C_3AH_6 . Krystalická forma AH_3 (gibbsit) se rozkládá mezi 210 – 300 °C a je spojená s přeměnou na AH (bohemit), který dehydratuje přibližně při teplotě 530 °C [49]. Transformace amorfního CA na $C_{12}A_7$ začíná kolem 400 °C [52], tento minerál je považován za první produkt dehydratace. Naopak Antonovič et al. v [53] hovoří o formování $C_{12}A_7$ až od 500 °C. Teplotu 600 °C provází vznik CA_2 z reakce s Al_2O_3 . S rostoucí teplotou dochází k dalším mineralogickým změnám, kdy výše uvedený $C_{12}A_7$ se přeměňuje zpět na CA. Při teplotách nad 750 °C již probíhá finální dekompozice $C_{12}AH_7$ [54]. Limitní teplota pro tento jev je 900 °C a vysvětlena může reakcí mezi Al_2O_3 a C_2A . Uvedený oxid hlinitý je produktem teplotního rozkladu AH_3 . Vlivem konečné dekompozice CAH dochází k největšímu poklesu pevnosti vazby hlinitanového cementu, a to v teplotním rozmezí 800 °C až 900 °C. Pokles je dán mimo jiné i faktem, že v uvedeném teplotním

rozmezí dosud není zformovaná keramická vazba [13]. V rozmezí 900 °C až 1000 °C probíhá proces rekrytalizace $C_{12}AH_7$ na CA a CA_2 [55]. Od teploty 1300 °C a výše dochází k reakci mezi CA_2 a oxidu hlinitého Al_2O_3 za vzniku CA_6 .

2.2.2.8 Vybrané komerčně dostupné hlinitanové cementy

Od dob výroby prvního hlinitanového cementu ve Francii (Cement Fondu®) došlo k celosvětovému rozšíření výroby hlinitanového cementu. V současné době existuje široká řada producentů zaměřených na výrobu hlinitanového cementu různých kategorií, chemického složení, využití a odolnosti vůči vysokým teplotám odlišné intenzity. Cílem této kapitoly není komplexní sumarizace všech hlinitanových cementů na komerčním trhu a jejich vlastností, nýbrž ilustrativní přehled nabízených produktů několika výrobců a uvedení základních parametrů, tak jak o nich informuje příslušný výrobce v technickém listu či jiných podkladech. Do níže uvedeného přehledu v **Tabulce 3** jsou zařazeny hlinitanové cementy vyráběné společností Górkal (Polsko), Kerneos – Secar (Francie), Celucem – ISTR (Chorvatsko), Almatis (Nizozemsko), Rongshen Group (Čína), Calight – CALTRA Nederland BV (Holandsko), ISICAQ (Turecko), AGC Ceramics - Asahi (Japonsko), Union Corporation (Jižní Korea). Trh stavebních materiálů nabízí i další producenty hlinitanového cementu např. v Číně, USA, Brazílii a v dalších státech.

Informace uvádějí jednotliví výrobci v technických či produktových listech k jednotlivým materiálům. Charakteristikou uváděnou všemi výrobci je obsah Al_2O_3 , jakožto základní parametr determinující vlastnosti hlinitanového cementu. Všichni níže uvedení výrobci rovněž uvádějí jemnost mletí měřenou metodou dle Blaina a pevnost v tlaku po 24 hodinách. Z uvedeného přehledu mimo jiné vyplývá, že s rostoucím obsahem oxidu hlinitého (Al_2O_3) se zvyšuje měrný povrch (cm^2/g měřeno na Blainově přístroji), na který výrobce daný cement mele. Rovněž lze říci, že jemnost mletí vybraných hlinitanových cementů je vyšší než typická měrná hmotnost běžných portlandských cementů [56]. U výrobců uvádějících v technických listech i maximální teplotu vhodnou pro aplikaci cementu, potažmo z cementu vytvořeného kompozitu, lze identifikovat přímo úměrnou závislost mezi množstvím oxidu hlinitého a maximální aplikovatelnou teplotou. Uvedený trend je v souladu s dostupnou literaturou. Pevnost v tahu za ohybu po 24 hodinách se pohybuje mezi 5 až 7 MPa (zohledněno pouze u cementů s dostupnými informacemi). Garantovaná pevnost v tlaku po 24 hodinách se pohybuje v rozmezí 16,5 až 70 MPa, kdy nejčastěji uváděná hodnota činí cca 40 až 50 MPa. U některých výrobců (např. Rongshen group, Górkal či Kerneos – Secar) s rostoucím obsahem oxidu hlinitého, a tím zvýšením odolnosti vůči žáru klesá garantovaná pevnost v tahu za ohybu po 24 hodinách.

Tabulka 3 Přehled dostupných informací o vybraných hlinitanových cementech různých výrobců [57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64].

Označení cementu	Max. teplota [°T]	Al_2O_3 [%]	CaO [%]	Blain [cm^2/g]	f_c 24h [MPa]	f_t 24h [MPa]
Górkal 40	1300	≥ 40	≤ 36	3100 – 3800	45	6
Górkal 50+	N/A	51–55	≤ 38	3200 – 3500	45	7
Górkal 70	N/A	69 – 71	28 – 30	4200 – 4500	> 30	5
Górkal 80	N/A	79 – 82	< 20	7500 – 9500	> 20	N/A
Secar®51	N/A	≥ 50	≤ 40	3700 – 4400	> 65	N/A
Secar®71	N/A	≥ 68,5	≤ 31	3700 – 4500	> 31,7	N/A
Secar®80	N/A	> 78,1	< 21,4	3700 – 4500	> 16,5	N/A

Ciment Fondu	N/A	≥ 37	$\leq 39,8$	3600 – 4400	$\geq 33,8$	N/A
ISTRA 40	1270	38 – 42	36 – 40	3100 – 3700	> 50	N/A
ISTRA 45	1350	≥ 44	37 – 41	3200 – 3800	≥ 40	N/A
ISTRA 50	1440	50 – 53	≤ 40	3300 – 3800	> 60	N/A
HiPerCem	N/A	63 – 65	$< 35,5$	4300 – 4700	> 20	N/A
CEMFAST	N/A	37 – 42	36 – 41	3700 – 4300	> 60	N/A
REFCON MG	N/A	50 – 53	≤ 40	3300 – 3800	> 45	N/A
LUMNITE	N/A	≥ 44	37 – 41	3200 – 3800	> 45	N/A
LUMNITE MG	N/A	38 – 42	36 – 40	3100 – 3700	> 30	N/A
LUMNITE M64	N/A	38 – 42	36 – 40	3800 – 4200	> 40	N/A
LUMNITE SG	N/A	38 – 42	36 – 40	3700 – 4300	> 60	N/A
REFCON	N/A	≥ 55	≤ 36	3300 – 3800	> 35	N/A
REFCON PLUS	N/A	≥ 52	≤ 39	3300 – 3800	> 60	N/A
CA-14 (Almatis)	N/A	69 – 71	28 – 30	2800 – 3300	35 – 48	N/A
CA-270 M (Almatis)	N/A	70 – 72	27 – 29	2800 – 3300	55 – 74	N/A
CA-470 TI R (Almatis)	N/A	70 – 72	25 – 29	2800 – 3300	20	N/A
CA-25 (Almatis)	N/A	78 – 81	17 – 19	2800 – 3300	25 – 38	N/A
Calumex SC-A	N/A	20 – 25	40 – 42	6000	N/A	N/A
Rongshen group CA-70	N/A	≥ 68	N/A	≥ 4000	≥ 40	$\geq 5,5$
Rongshen group CA-80	N/A	≥ 77	N/A	≥ 4500	≥ 30	≥ 5
Rongshen group CA-65 high alumina	1680	64 – 66	32 – 34	4500	45	6
Rongshen group CA-68 high alumina	1710	67 – 69	29 – 31	4500	45	6
Rongshen group CA-70 high alumina	1730	69 – 71	27 – 29	5000	45	6
Rongshen group CA-75 high alumina	1750	73 – 75	23 – 25	5500	45	6
Rongshen group CA-80 high alumina	1770	77 – 80	18 – 20	7000	35	5
CALIGHT 70	1600	70,4	28,6	4500	≥ 40	≥ 5
ISICAQ 40	N/A	39,8	36,2	3000	70	N/A
Asahi Alumina Cement No. 1	N/A	55	N/A	4600	50	6
Asahi Fondu (AF-1)	N/A	42	N/A	3500	30	5
UAC-70S	N/A	71	≤ 28	≥ 4000	30	4

* N/A – informace nebyla dostupná

2.3 VLÁKNA V KOMPOZITECH

Zatímco pro konstrukční, vysokopevnostní či ultra-vysokopevnostní betony znamenají vysoké teploty extrémní prostředí z hlediska podmínek, frekvence výskytu v rámci životního cyklu, předpokládané doby trvání atd., pro žáruvzdorné materiály se naopak jedná o prostředí přirozené. Problematika odprýskávání se však týká i oblasti žárobetonů či žáruvzdorných

materiálů. Obdobně jako u nežáruvzdorných betonů na bázi portlandského cementu spočívá základní důvod vzniku explozivního odprýskávání v překročení lokálního napětí pevnosti v tahu daného materiálu. K tomuto jevu může dojít nejčastěji při prvním vystavení materiálu účinku vysokých teplot. Během následujícího životního cyklu se již prvek zhotovený ze žáruvzdorného materiálu obvykle vyskytuje v prostředí, které neumožňuje absorpci vzdušné vlhkosti, a tedy opětovné riziko vzniku explozivního odprýskávání. Problém může nastat při rychlém vysoušení (prvotním zahřívání), kdy se ve vnitřní struktuře kompozitu stále ještě nachází vlhkost. Důvody nárůstu napětí v případě žáruvzdorných materiálů jsou obdobné jako u běžných cementových kompozitů:

- nárůst pórového tlaku vlivem omezeného prostoru pro unikající vodní páru (nízká permeabilita) a
- napětí vzniklé z důvodu odlišných teplot na ohřivaném povrchu a uvnitř vzorku či prvku [65].

Již v polovině 80. let 20. století publikoval Hipps et al. [66] práci týkající se měření vnitřního tlaku jakožto parametru indikujícího riziko popisovaného jevu. Popisem vnitřního tlaku páry v pórové struktuře hutných žárobetonů v závislosti na teplotě se zabýval Wang Z. et al. v [67]. Právě ze znalosti pórového tlaku a jemu odpovídající teploty lze predikovat místo potenciálně ohrožené rizikem explozivního odprýskávání. V případě žáruvzdorných materiálů je často vyšetřován vliv tzv. rychlého vysoušení, tedy prudkého nárůstu teploty nevysušených materiálů s vyšším obsahem vody.

Polypropylénová vlákna se běžně využívají jako způsob zlepšení chování silikátových kompozitů v prostředí vysokých teplot (viz další kapitoly). B. Collignon et al. vyšetřoval v [68] možnost využití polypropylenových (PP) vláken v žáruvzdorných kompozitech s nízkým obsahem cementu („low-cement castable“). B. Collignouem vyšetřoval permeabilitu v závislosti na množství použitých vláken a teplotě výpalu. Účinek PP vláken na permeabilitu se projevil až v teplotním rozmezí, kdy dochází k tání samotných vláken, dle B. Collignouna mezi 120 °C a 220 °C. Nad hranici 220 °C již nemají PP vlákna na permeabilitu vliv. S rostoucím objemem použitých vláken (od 0,0 % po 0,20 % vztaženo na hmotnostní procenta) dochází k růstu permeability, a to ve všech sledovaných teplotních úrovních (od 80 °C po 500 °C). Dle zjištění C. Ribeiro et al. v [69] souvisí riziko projevů explozivního odprýskávání rovněž se zaplňováním pórů druhotnými hydratačními produkty vznikajícími v rámci procesu uvolňování vázané vody. Vše bylo pozorováno v rámci měření permeability pomocí plynu.

Vliv vláken v cementových kompozitech byl částečně popsán výše v kapitole v rámci projevů explozivního odprýskávání. Následující řádky popisují použití vláken v cementových kompozitech vystavených účinkům teplotního zatížení, ovšem bez zvláštního zřetele k jevu explozivního odprýskávání. Základní důvod implementace vláken různých materiálů do struktury cementových kompozitů spočívá ve snaze zvýšit mechanické parametry, především pak pevnost v tahu či v tahu za ohybu. Mechanické parametry však nepředstavují jediný a mnohdy ani nejdůležitější důvod pro jejich použití.

Aplikace vláken v cementových kompozitech s potenciální možností vystavení působení vysokých teplot vychází ze dvou hlavních principů – prosté dosažení lepších mechanických parametrů, případně se počítá s jejich vyhořením a uvolněním prostoru pro unikající vodní páru [70]. Vlákna vhodného materiálu (např. čedič, keramika) rovněž pozitivně přispívají k celkovému chování cementových kompozitů v prostředí vysokých teplot. Pro výsledné vlastnosti vlákny vyztuženého kompozitu určeného do prostředí vysokých teplot je nutné zajistit trvanlivost cementové matrice, plniva a materiálu použitých vláken v prostředí

vysokých teplot. Krucialním parametrem je pak zajištění kompatibility vláken a matrice v podmínkách vysokých teplot.

2.3.1 Azbestová vlákna

Jako azbest souhrnně nazýváme skupinu šesti silikátových minerálů vyskytujících se v přírodě ve vláknité formě. Ze skupiny amfibolů můžeme identifikovat minerály jako aktinolit, amosit, antofylit, krocidolit a tremolit [71]. Nejčastější forma výskytu je serpentinit, následovaný amfibolitem. Mineralogický název serpentinitu je chryzolit ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$), pro amfibolit se někdy používá název amosit [72].

Přírodní azbestová vlákna byla využívána pro svoji dostupnost a vlastnosti již od dob starověku. Širší rozšíření do oblasti výroby stavebních materiálů a použití ve stavebnictví se obecně datuje od počátku 20. století, kdy započala výroba tzv. eternitu (lat. aeternum – věčnost). Kombinace cementu a azbestových vláken sloužila k výrobě střešních krytin, trubek, rour, tvarovek a dalších tenkostěnných prvků. Širokého rozšíření dosáhl azbest díky svým mechanickým parametrům, odolnosti vůči zásaditému i kyselému prostředí a především schopnosti odolávat účinkům vysokých teplot [73, 74]. Právě posledně zmíněná vlastnost umožnila široké rozšíření azbestu jako tepelně-izolační, případě protipožární nástříky, obklady či vláknité izolace.

Tvar a především velikost vláken (průměr v rozmezí 0,02 – 0,4 μm) umožňuje jejich pronikání dýchacím ústrojím až do plic s následným rozvojem zdravotních potíží. První zprávy a výzkumy v této oblasti vznikly již v 60. letech 20. století. Vlákna azbestu se zabodávají do plicních sklípků. Pokud expozice azbestu trvá delší dobu, dojde k rozvoji onemocnění zvanému *pleurální mesoteliom*, což je typ rakovinotvorného onemocnění. Počátkem 80. let minulého století se začínaly rozšiřovat postupné zákazy používání azbestu (např. Island 1983, Rakousko 1990, Německo 1993) [75]. Zákaz v rámci Evropské unie přišel 24. dubna 1999 směrnici 1999/3/CE. V Československu bylo použití azbestu omezeno v roce 1984 (Směrnice Ministerstva zdravotnictví č.64/1984 Sb.), která stanovila možnost použití azbestových výrobků pouze v případech, kdy není jiná materiálová náhrada. Problematiku azbestu v české legislativě rovněž řeší zákon o odpadech, zákon o ochraně veřejného zdraví či zákoník práce.

2.3.2 Čedičová vlákna

Čedič (bazalt) je výlevná vyvřelá hornina obvykle tmavého barevného odstínu s teplotou tání v rozmezí 1500 °C až 1700 °C. Slouží jako výchozí surovina pro výrobu čedičových vláken. Vývoj technologického postupu pro výrobu čedičových vláken započal již na začátku 20. století, velkého rozmachu se však dočkal až po druhé světové válce. Definitivní způsob průmyslové výroby byl vyvinut v roce 1954 v tehdejší Sovětském svazu [76]. V současné době patří mezi největší výrobce čedičových vláken Čína, Rusko a Ukrajina. Čistota vstupní suroviny, ovlivněná např. lokalitou těžby, determinuje výsledný produkt. Důležitý je zejména obsah oxidu křemičitého, podle kterého lze čedičová vlákna rozdělit do následujících kategorií (uvedená procenta jsou hmotnostní):

- alkalické ($\text{SiO}_2 < 42 \%$)
- slabě kyselé ($\text{SiO}_2 43 - 46 \%$)
- kyselé ($\text{SiO}_2 > 46 \%$) [77].

Množství SiO_2 určuje viskozitu taveniny. Pro zpracování v rámci průmyslové výroby vláken se používají tzv. kyselé čediče. Výroba čedičových vláken se velmi podobá výrobě vláken

skleněných, ovšem za nižší energetické náročnosti a bez požadavku na speciální aditiva [78]. Vstupní surovina – drcený čedič – je tavena v elektrické peci a vzniklá tavenina je protlačována přes platinum-rhodiový prstenec vytvářející tenký pramen. Tavenina protéká na střed rozvlákňovacího kotouče, který vlivem odstředivé síly rozděljuje taveninu na drobné kapičky, které se vytahují do podoby vláken. Tento způsob výroby se nazývá odstředivý a vznikají při něm vlákna nejednotných délek vhodná pro izolační hmoty. Další metoda využívá vzduchovou dyšnu. Tzv. pneumatické rozfukování umožňuje vznik vláken nestejných délek s horšími mechanickými vlastnostmi. Metoda mechanického způsobu výroby – tzv. kontinuální výroba – využívá zvlákňovací trysku, přes kterou vlivem působení gravitační síly protéká tavenina a okamžitě chladne a je navíjena na buben. Vzniklé nekonečné vlákno je následně řezáno na požadovanou délku [76, 79]. Čedičová vlákna korespondují se současnými trendy a požadavky na stavební materiály, kdy důležitou roli hraje nejen technologie výroby, ale i její energetické nároky spolu s koncem životního cyklu materiálu a možností jeho recyklace.

Li [80] vyšetřoval vliv čedičových vláken jako výztuže geopolymerních betonů s výsledkem významného zlepšení deformačních charakteristik a zvýšení schopnosti absorpce energie.

Obdobně jako u dalších žáruvzdorných materiálů ovlivňuje celkový obsah SiO_2 a Al_2O_3 schopnost čedičových vláken vzdorovat účinkům vysokých teplot. Zároveň bylo pozorováno [81], že tahová pevnost čedičových vláken roste v závislosti na rostoucím obsahu SiO_2 a Al_2O_3 . Čedičová vlákna a materiály z nich zhotovené z části nahradily dříve velmi rozšířená vlákna azbestová, a to především z důvodu jejich mechanických charakteristik, chování za vysokých teplot a současné zdravotní nezávadnosti [82]. V případě čedičových vláken se velmi často zmiňuje jejich benefit v podobě nižších pořizovacích nákladů (např. ve srovnání s vlákny uhlíkovými).

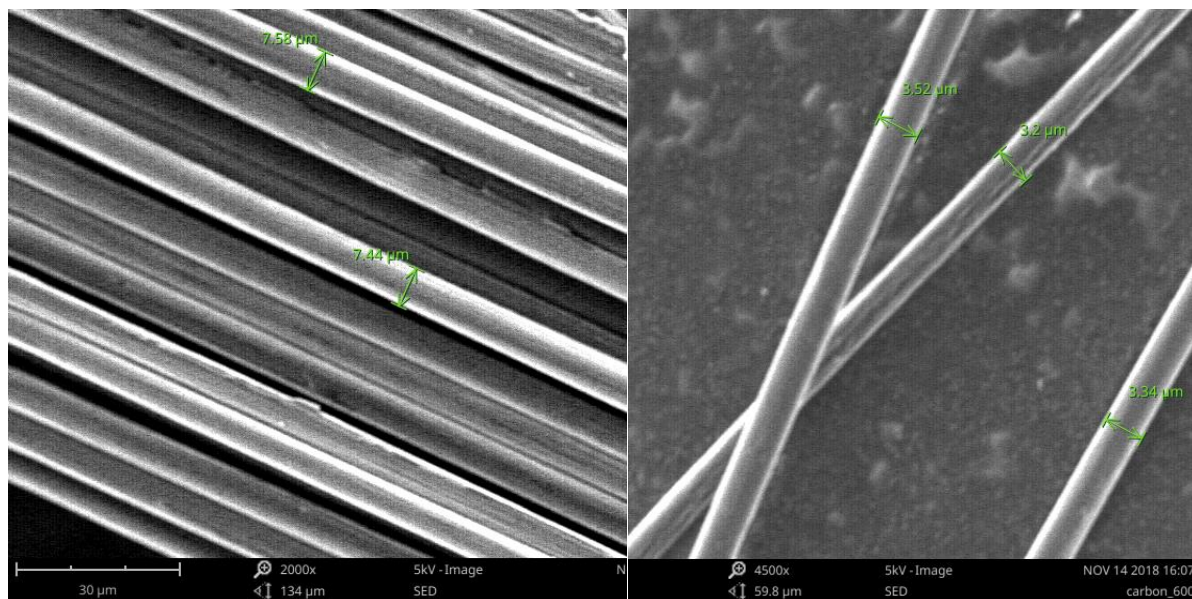
2.3.3 Keramická vlákna

V oblasti žáruvzdorných komponent představují keramické materiály velmi rozšířený základ pro výrobu především izolačních prvků, jako jsou desky, vlákna, obklady atp. [83]. Žáruvzdorné materiály a materiály pro vysokoteplotní aplikace nepředstavují jedinou možnost využití keramických vláken. Su et al. [84] popsal pozitivní efekt přídavku 0,1 %, 0,2 % a 0,3 % keramických vláken (vztaženo k objemovým procentům) na odolnost vůči dynamickému zatížení. Použitá vlákna dosahovala modulu pružnosti 380 GPa, pevnosti v tahu 3000 MPa, maximální rozsah použití limitovala teplota 1204 °C a více než 99 % chemického složení připadalo na Al_2O_3 . Pro keramická vlákna používaná v prostředí vysokých teplot a žáruvzdorných materiálů se v anglické terminologii používá zkratka RCF (refractory ceramic fibers). Tato vlákna jsou vyráběna tavením směsi oxidu hlinitého a oxidu křemičitého v přibližném poměru 1:1 při teplotě 1925 °C. Vlastnosti, pro které je tento materiál vhodný, jsou především nízká teplotní vodivost a tepelná kapacita, odolnost vůči teplotnímu šoku, nízká hmotnost a výborná odolnost vůči korozi [85].

2.3.4 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna, někdy také označována jako karbonová, dosahují vysokých užitných vlastností, a proto nacházejí uplatnění v širokém spektru technických oborů. Oblast rekonstrukce a zesilování konstrukcí tvoří dominantní použití karbonových vláken, nejčastěji ve formě tkanin a rohoží. Z karbonu samozřejmě lze také vyrábět sekaná vlákna různých délek, která se mohou uplatnit při výrobě vláknových cementových kompozitů. Karbonová čili uhlíková vlákna mají podobný průměr jako vlákna skleněná (9 – 18 μm). Dle způsobu

výroby a modifikace karbonu, uspořádání do vláken nabývá pevnost v tahu hodnot v rozmezí 0,5 – 3 GPa a modul pružnosti 28 – 480 GPa. Objemová hmotnost karbonových vláken je v rozmezí 1,6 – 2,15 kg·m⁻³.



Obrázek 6 Snímek z elektronového mikroskopu uhlíkových vláken TENAX® - A HTC124 v laboratorních podmínkách (průměr 7,5 μm) – vlevo a po výpalu při 600 °C (průměr 3,4 μm) – vpravo.

2.3.5 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se běžně využívají při výrobě vláknobetonů, především pro eliminaci smršťovacích trhlin v raných fázích hydratace cementu. Rovněž lze popsat i výzkumné práce, které se věnovaly využití skelných vláken v prostředí vysokých teplot. Již v roce 1971 byl na univerzitě v Belfastu realizován výzkum zaměřený na analýzu tahových charakteristik [86] hlinitanového cementu a skleněných vláken v souvislosti s časem a podmínkami ošetřování. Běžná skleněná vlákna nemohou být použita v prostředí běžného portlandského cementu z důvodu alkalického prostředí [87]. Odolnost skleněných vláken vůči agresivnímu prostředí, které je pro beton přirozené, zajistí přítomnost oxidu zirkonu (ZrO₂) o obsahu 16 % až 20 %. Sortiment výrobců nabízí vlákna ve formě nekonečných provazců či vlákna jedné požadované délky. Např. vlákna Cem-FIL® ANTI-CRAK™ vykazují modul pružnosti 72 GPa a pevnost v tahu 3500 MPa. Interval modulu pružnosti v případě sklených vláken je 70 – 80 GPa a pevnost v tahu 2000 – 4000 MPa.

Skleněná vlákna se dělí do skupin klasifikace obecné klasifikace skla a to do následujících tříd.

Třída A – svým složením nejvíce odpovídá sklu do okenních tabulí

Třída C – oproti sklu třídy A vykazuje větší odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí

Třída E – odpovídá třídě C, ale vykazuje vyšší schopnost izolovat elektrický proud

Třída AE – alkalivzdorné sklo

2.3.6 Textilní beton a vysoké teploty

Textilní beton (*TRC – textile reinforced concrete*) představuje progresivní materiál použitelný v širokých oblastech stavebnictví a designu. Je s výhodou využíván jako materiál pro fasádní panely, zesilování ohýbaných a tlačených konstrukčních prvků, prefabrikované elementy pro nosné konstrukce apod. Uvedený kompozit kombinuje výhody moderních vysokopevnostních a vysokohodnotných cementových kompozitů a textilních výztuží rozdílných tvarů, pevností a materiálů. V souvislosti s využitím TRC vyvstala otázka interakce TRC a prostředí vysokých teplot, např. při požáru. Zde je na místě řešit interakci cementového kompozitu s účinky vysokých teplot (viz kapitola 2.4 níže) a dále odolnost materiálu textilní výztuže včetně případné povrchové úpravy. Např. Antons et al. [88] podrobil analýze vysokých teplot T-průřez vyztužený uhlíkovou a skleněnou (AR) výztuží a pozoroval výrazný pokles mechanických parametrů při teplotě nepřesahující 600 °C.

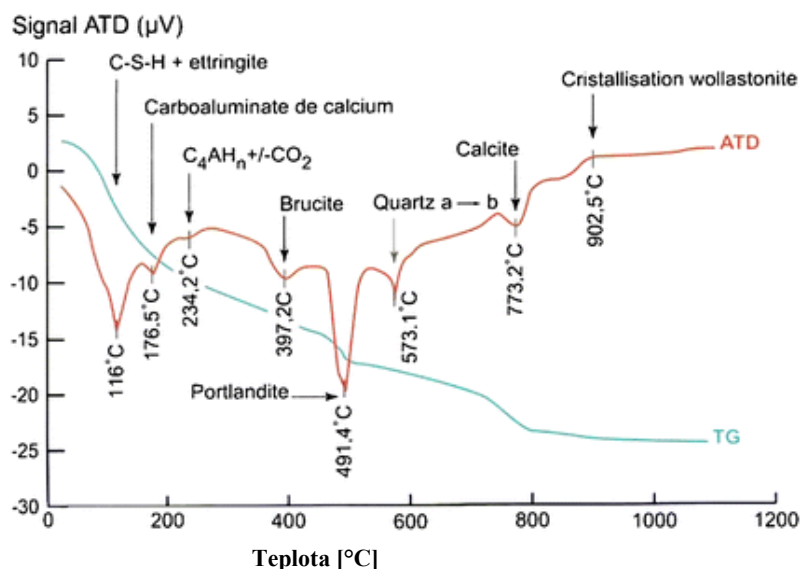
Antons et al. v [89] vyšetřoval účinek vysokých teplot do úrovně 1100 °C na kvádrových vzorcích 40×40×200 mm s textilní výztuží ze skla rezistentního vůči alkáliím (AR), a to na základě čtyřbodové ohybové zkoušky. Do cca 300 °C se účinek vysokých teplot nijak zásadně neprojevil. Naopak v teplotním rozmezí 570 °C – 620 °C byl zaznamenán výrazný vliv transformace křemene, popsáný v rámci kapitoly 4. Teploty nad 620 °C jsou ve znamení měknutí a tavení textilní výztuže (sklo rezistentní vůči alkáliím), které se projeví poklesem tuhosti celého vzorku, spojeným se snížením sklonu pracovního diagramu.

2.4 VLIV VYSOKÝCH TEPLŮ NA PORTLANDSKÝ CEMENT

Portlandský cement je hydraulické pojivo charakterizované čtyřmi základními slínkovými minerály. Jsou to C₃S (alit), C₃A (amorfní fáze), C₄AF (celit) a β-C₂S (belit). Při hydrataci cementu vznikají rovněž krystalické minerály (CH, případně ettringit), většina hydratačních produktů se však vyskytuje ve formě C-S-H gelů [90]. Hydratovaný cement, pro jehož vznik je nutný výpal vstupních surovin při vysokých teplotách (cca 1450 °C), reaguje na vysoké teploty různými fyzikálně chemickými změnami a procesy. Obdobně, jako v případě hlinitanového cementu (viz kapitola 2.2.2.7), nastává při zvyšování teploty ztráta vody vázané v kompozitu, a to postupně od fyzikálně vázané vody ve formě kapilární vlhkosti až po vodu chemicky vázanou. V teplotním intervalu cca 50 °C až 150 °C probíhá dehydratace ettringitu (kdy dochází k uvolňování molekul vody) [91, 92]. Ettringit dehydratuje již v relativně nízkých teplotách, které odpovídají běžným teplotám používaným pro laboratorní vysoušení vzorků (např. 105 °C). Castellote et al. uvádí, že ettringit ztrácí svoji krystalovou formu již při teplotě okolo 80 °C [93]. Dle [94] probíhá v intervalu 150 °C až 170 °C rozklad sádry (CaSO₄·2H₂O). Interval teplot pro sádro uvažují různí autoři odlišně, např. Dweck et al. v [95] udává rozmezí 110 °C až 140 °C. Z průběhu TGA křivek znázorňujících ztrátu vlhkosti je možné odvodit dehydrataci C-S-H gelů již od 100 °C [96]. Krystalické fáze CSH jako tobermorit se transformují přibližně při teplotě 400 °C [97]. Pro portlandský cement je důležitý rozklad portlanditu dle následující rovnice: Ca(OH)₂ → CaO + H₂O↑. Podle Songa et al. [98] probíhá dehydratace portlanditu v rozmezí 455 °C – 630 °C. Rozklad portlanditu podle [99] byl identifikován při 491 °C, jak je uvedeno na **Obrázku 7**. Dle Zhanga [100] leží tato teplota v rozmezí 400 °C až 450 °C. Rozklad portlanditu v cementovém tmelu potvrzuje zvýšený obsah CaO [101]. V průběhu případného skrápění konstrukce vodou během eliminace požáru dochází k hašení volného vápna podle následující rovnice (7):



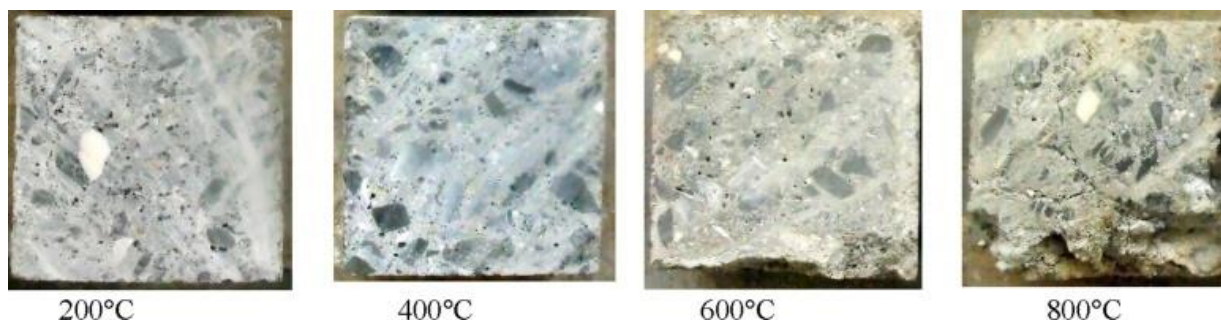
Tato reakce je spojena s nárůstem objemu (rozpínáním) a může způsobit další poškození betonu [102]. Rozklad CaCO_3 na CaO a CO_2 probíhá při teplotách nad $700\text{ }^\circ\text{C}$ a nad teplotou $800\text{ }^\circ\text{C}$ můžeme rovněž zaznamenat významnou ztrátu hmotnosti [103].



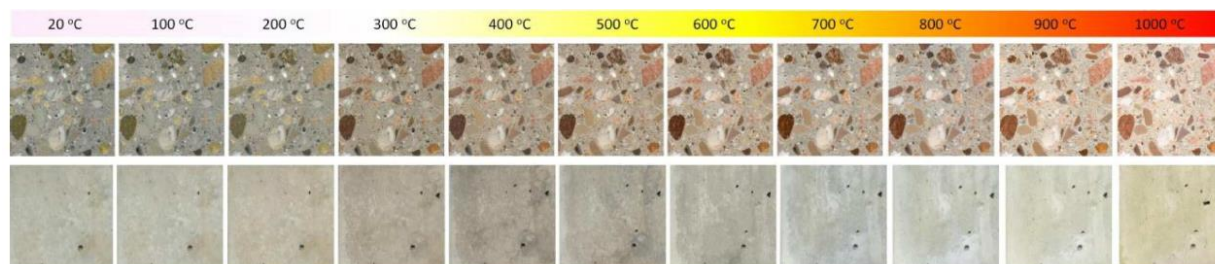
Obrázek 7 TGA a DTA analýza betonu s portlandským cementem, převzato z [99].

Rodriguez et al. potvrdil ve své práci [104] exotermickou transformaci C-S-H na β -wollastonit (CaSiO_3), ke které dochází v teplotním rozmezí $800\text{ }^\circ\text{C} - 900\text{ }^\circ\text{C}$, a následně endotermickou transformaci β -wollastonitu na α -wollastonit ($1220\text{ }^\circ\text{C} - 1280\text{ }^\circ\text{C}$). Rankin et al. [105] uvádí teplotu transformace wollastonitu hodnotou $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Teplota transformace C-S-H na wollastonit nastává při teplotě nad $800\text{ }^\circ\text{C}$, ovšem tato teplota může být vyšší, a to v závislosti na poměru C/S [98]. V souvislosti s betony s portlandským cementem se hovoří i o negativním vlivu kameniva obsahujícího křemen na mechanické charakteristiky a celkovou soudržnost betonu. Při teplotě $573\text{ }^\circ\text{C}$ totiž probíhá změna krystalické fáze β -křemene (triklinická forma) na α -křemen (hexagonální) [106] doprovázená změnou objemu transformovaného křemene (lineární expanze $0,45\%$) [107, 108]. V teplotní úrovni $600 - 800\text{ }^\circ\text{C}$ probíhá druhá fáze dekompozice C-S-H a formace β - C_2H (počátek dehydratace C-S-H lze identifikovat při teplotách do $200\text{ }^\circ\text{C}$) [94].

Kromě výše popsaných mineralogických, fyzikálních a chemických změn lze rovněž pozorovat makroskopické změny spojené s účinkem vysokých teplot na kompozity na bázi portlandského cementu. Uvedené projevy souvisejí se vznikem trhlin a rovněž s barevnými změnami, které vycházejí z mikroskopických změn. S rozvojem optických metod a analýzy barevného spektra je možné pomocí RGB modelu identifikovat úroveň teplotního zatížení, kterému byl hodnocený beton vystaven. Uvedenou metodu lze využít např. při předběžné analýze betonových konstrukcí zatížených požárem. *Prvotní barevná změna koresponduje s uvolňováním vody z cementové pasty. Výsledná barevná změna je dána sumou barevných změn v cementové pastě a v kamenivu* [94]. Barevné změny betonů z portlandského cementu ilustrují **Obrázky 8** a **9**. Z hlediska účinků teploty lze výrazné barevné změny pozorovat v červených až narůžovělých odstínech daných oxidy železa v kamenivu (např. hematit, limonit, goethit atd.) [109]. Dále lze pozorovat při teplotách v rozmezí $600\text{ }^\circ\text{C} - 900\text{ }^\circ\text{C}$ výrazné zesvětlení vlivem rozkladu uhličitanu vápenatého v kamenivu. Působení teploty v intervalu $900\text{ }^\circ\text{C} - 1000\text{ }^\circ\text{C}$ je ve znamení žlutohnědé barvy [94, 109].



Obrázek 8 Barevné a strukturální změny v běžném betonu vlivem odlišných teplotních zatížení [103].



Obrázek 9 Barevné a strukturální změny betonu vlivem postupně zvyšujícího se teplotního zatížení [94].

2.4.1 Explosivní odprýskávání („*explosive spalling*“)

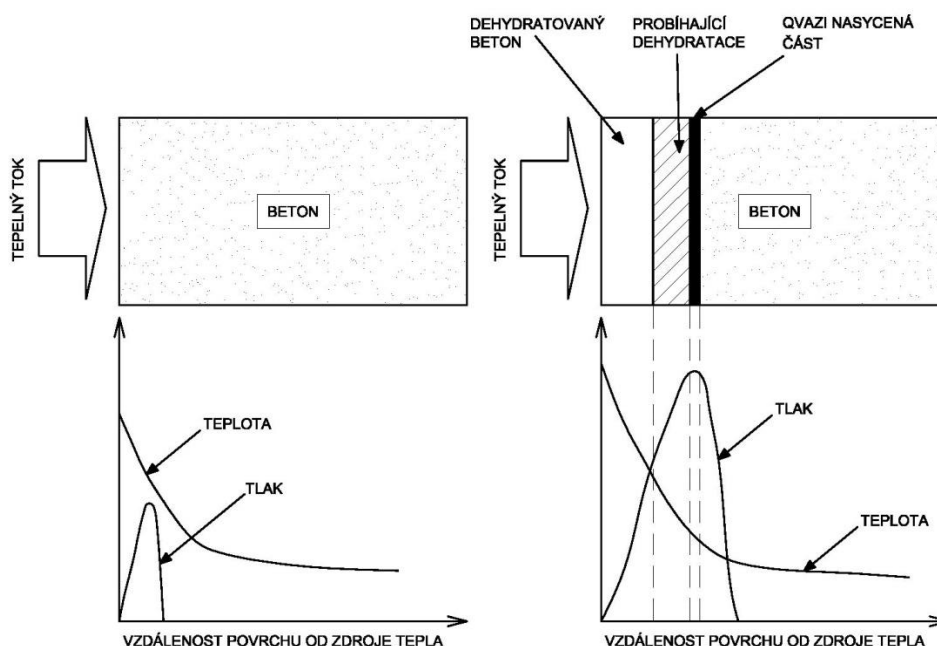
Betonové konstrukce vystavené účinku vysokých teplot, např. při požáru, doprovází odprýskávání povrchových částí, které může být provázeno zvukovými efekty. Fragменты mohou z povrchu odlétávat značnou rychlostí. V anglické literatuře se tento jev označuje jako „*explosive spalling*“ či „*surface spalling*“ (dále se ještě hovoří o „*aggregate spalling*“ a „*corner spalling*“). Úlomky znamenají jednak nebezpečí ve formě letícího předmětu, zároveň však dojde k odkrytí ocelové výztuže, která již není chráněna krycí vrstvou a je v přímém kontaktu s působícím teplotním zatížením (požárem) [110]. V běžném betonu vystaveném účinkům vysokých teplot dochází ke dvěma základním jevům:

- omezení tepelné dilatace vody uvnitř pórů v betonu, čímž dojde k rozvoji tahového biaxiálního tlakového napětí rovnoběžně s oteplovaným povrchem, což vede k následnému rozvoji tahového napětí ve směru kolmém na ohřívání povrch
- nárůst tlaku v pórech jako důsledek odpařování fyzikálně a chemicky vázané vody, čímž dojde k tahovému namáhání [111, 112].

Dle teorie prezentované prof. Bažantem [113] je *explosivní odprýskávání výsledkem křehkého porušení a delaminace způsobené tlakovým víceosým namáháním působícím rovnoběžně s povrchem vystaveným zdroji tepelné energie*. Za kritické místo, kde může nejdříve dojít k výše popsaným negativním projevům účinku vysokých teplot, je považován roh konstrukce či zkušební vzorku. Důvodem je nelineární rozložení teploty v těchto částech [114], kdy ohřívání část dosahuje větší plochy než odpovídající plocha uvnitř hmoty vzorku, přes kterou je tepelný tok odváděn do hlubších struktur. Princip popsaného jevu odpovídá principu tepelného mostu v rohu budovy (ochlazované ploše exteriéru odpovídá menší plocha v interiéru).

Pokud pevnost v tlaku (měřeno na krychli o hraně 150 mm) nepřekročí 60 MPa, nelze očekávat explozivní odprýskávání ani v případě vysokého obsahu vlhkosti v pórové struktuře. S rostoucí tlakovou pevností a obsahem vlhkosti však vzrůstá riziko projevů explozivního

odprýskávání [114]. Princip popisovaného jevu u betonu vyšší a nižší pevnostní třídy znázorňuje **Obrázek 10**.



Obrázek 10 Princip explozivního odprýskávání (vlevo beton nižších pevnostních tříd, vpravo beton vysokých pevností) [114].

2.4.1.1 Vliv okrajových podmínek

Možnostem jak zvýšit odolnost vysokopevnostního betonu se věnoval Gai-Fei Peng et al. v [115], který sledoval vliv okrajových podmínek na mechanické charakteristiky při ošetřování čerstvého betonu. Gai-Fei Peng aplikoval jednoduché (vodní lázeň, teplá vodní lázeň po 2 dny a horký vzduch o 200 °C po dobu 2 dnů) a kombinované ošetřování (vodní lázeň po 6 dnů a následně teplý vzduch o 200 °C, teplá lázeň po 2 dny a teplý vzduch o 200 °C a teplá lázeň následovaná teplým vzduchem o 250 °C). Z hlediska jednoduchého způsobu ošetřování docházelo k explozivnímu odprýskávání v rozmezí teplot 195 °C až 255 °C. Rovněž při užití některých kombinovaných způsobů ošetřování docházelo k projevům explozivního odprýskávání, avšak až po dosažení vyšších teplot v intervalu 520 °C až 630 °C. Aplikujeme-li během prvních dvou dnů ošetřování ve vodní lázni o teplotě 90 °C a v následujících třech dnech ošetřování suchým, horkým vzduchem o teplotě 250 °C, nedochází u směsi použité Gai-Fei Pengem k projevům explozivního odprýskávání. Pevnost v tlaku takto ošetřovaného betonu dosahovala průměrně cca 170 MPa (měřeno na krychlicích o hraně 100 mm). Maximální teplota, které byly vzorky při testování vystaveny, dosahovala 800 °C. Dle autorů umožňuje popsání způsob eliminovat negativní účinky vysokých teplot bez nutnosti aplikovat polypropylenová vlákna. Popsaný způsob ošetřování je však aplikovatelný pouze pro prefabrikované prvky a navíc je energeticky náročný.

2.4.1.2 Použití vláken

Jedním z nejrozšířenějších materiálů používaných pro výrobu rozptýlené výztuže do betonu je ocel. Ocelová vlákna většinou pouze oddálí vznik popsaného fenoménu, nezabrání ale jeho vzniku [116]. Naopak Lau et al. v [117] uvádí, že 1 % ocelových vláken eliminovalo explozivní odprýskávání. Vliv však mohlo mít rovněž složení použitého betonu a dále

rychlost teplotního zatěžování, jak ostatně uvádějí sami autoři. Rovněž Gai-Fei Peng et al. v [118] uvádí, že ocelová vlákna efektivně zamezí projevům explozivního odprýskávání. I přes vyztužení 2 % vysokopevnostních ocelových vláken (pevnost 2000 MPa) docházelo při povrchové teplotě 275 °C (teplota vzduchu v peci dosahovala 675 °C) k projevům explozivního odprýskávání. V rámci experimentu provedeného v [119] byly testovány velkorozměrné vzorky 200×100×2000 mm. Obecně uznávaným způsobem zlepšení požární odolnosti betonu je použití vláken, která při požáru vyhoří, a do vzniklého prostoru může expandovat vodní pára, která tak má více volného prostoru a dojde ke snížení tlaku vodní páry na vnitřní strukturu betonu [70, 120]. Druhé vysvětlení, které je rovněž uváděno v odborné literatuře, vychází z předpokladu, že polypropylenové vlákno při procesu vyhoření vytvoří ve svém nejbližším okolí mikrotrhliny, které dodatečně zvýší permeabilitu [121], a tím umožní snížení pórového tlaku vodních par. Lui et al. [122] zkoumal vliv ocelových, polypropylenových (PP) a polyethylenových (PE) vláken na odolnost vůči explozivnímu odprýskávání vysokopevnostních betonů. PE vlákna nedokázala předejít projevům explozivního odprýskávání, zatímco PP vlákna v cca 1/6 množství oproti PE již účinně tomuto projevu zabránila. Jin-Cheng Liu et al. spatřuje důvod v rozdílné teplotě tání obou materiálů (144 °C pro PE a 170 °C pro PP). Výše uvedené zkoušky probíhaly na válcových vzorcích průměru 100 mm a výšky 200 mm. Po roztavení zůstává většina PE vlákna ve svém kanálu a neproniká hlouběji do struktury betonu. Zároveň nebyly zjištěny (pomocí elektronové mikroskopie) žádné mikrotrhliny v okolí vlákna, které by zvyšovaly permeabilitu. O schopnosti polymerových (polypropylenových vláken) účinně zvýšit odolnost UHPC kompozitů vůči odprýskávání hovoří rovněž Zhang et al. v [123], a to opět na základě rostoucí permeability vlivem zvyšující se teploty. Při teplotě 150 °C dochází k tavení PP vláken, čímž vznikají volné prostory (kanálky po vláknech). Dle Zhanga však prázdné kanálky výrazně nepřispívají ke zvýšení permeability betonu, důležité je ale vytvoření vzájemně provázané a propojené sítě prasklin při teplotách nižších, než je tavení vláken. Tvorba těchto trhlin vzniká následkem odlišných hodnot tepelné roztažnosti matrice a vláken.

Rovněž byly provedeny rozličné experimenty zaměřené na vliv vláken širokého materiálového spektra včetně přírodních vláken na odolnost betonu vůči explozivnímu odprýskávání. Silva et al. v [124] vyšetřoval vliv jutových vláken (sisalu) na vlastnosti vysokohodnotného betonu. Vlivem jutových vláken jako preventivního opatření vůči explozivnímu odprýskávání se zabýval Kalifa et al. [125]. Porovnáním přírodních jutových vláken, polyvinylových vláken a polypropylenových vláken a jejich účinku na chování vysokopevnostního betonu v prostředí vysokých teplot byl prokázán pozitivní vliv polypropylenových vláken [125].

Z prací provedených autorem v rámci výzkumu v laboratořích Experimentálního centra lze odvodit nízkou odolnost vysokopevnostního betonu vyztuženého ocelovými vlákny („ultra-high performance fibre reinforced concrete UHPFRC“) vůči efektu explozivního odprýskávání. Na **Obrázku 11** je znázorněna krychle o hraně 150 zhotovené z UHPFRC o tlakové krychelné pevnosti cca 150 MPa, na které lze pozorovat jev explozivního odprýskávání. Ani důkladné vysušení při 105 °C po dobu 7 dnů nezabránilo negativním projevům rozpínání zbytku vodní páry ve vnitřní pórové struktuře. Drátky z vysokopevnostní oceli pouze zadržely největší fragmenty, stále však docházelo k rozptýlu malých fragmentů do okolí. K destrukci níže uvedené krychle došlo po cca 30 minutách teplotního zatížení v úrovni 400 °C (gradient nárůstu teploty 5 °C/min).

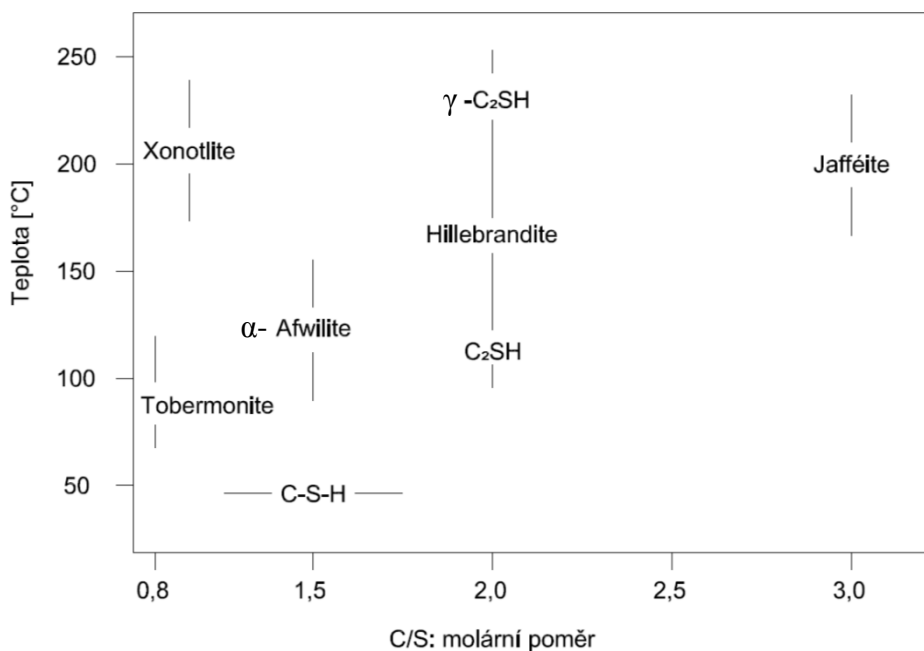


Obrázek 11 Krychle o hraně 150 mm zhotovená z UHPFRC po účinku teploty v úrovni 400 °C.

2.5 HYDROTERMÁLNÍ OŠETŘOVÁNÍ

Vývoj mechanických vlastností v čase představuje jednu ze základních charakteristik silikátových kompozitů, kterou lze ovlivnit např. okrajovými podmínkami v počátečních fázích hydratace cementu (teplotou, tlakem, vlhkostí), použitím vhodných přísad ovlivňujících hydrataci cementu (urychlovače a zpomalovače tuhnutí), množstvím a typem použitého cementu atp. Okrajové podmínky při počátečních fázích tuhnutí a tvrdnutí cementových kompozitů představují určující parametry ovlivňující finální základní a mechanické vlastnosti, trvanlivost, smrštění, dotvarování a především rychlost nárůstu pevnostních charakteristik.

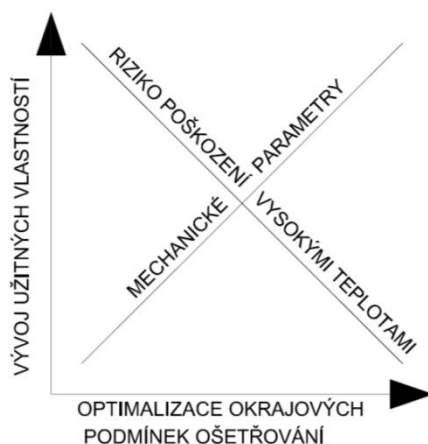
Existují metody pro akceleraci hydratačního procesu, které vedou k rychlému počátečnímu nárůstu mechanických vlastností betonu. Nejčastěji se využívá prostředí nasycené vodní párou a teplotou mezi 60°C až 90°C. Možnosti urychlení nárůstu mechanických vlastností betonu formou ošetřování v prostředí zvýšených teplot nasyceném vodní párou (tzv. propařování) využívaly především výrobny prefabrikovaných železobetonových prvků již v 70. letech 20. století. Kim et al. ve studii [126] zjišťoval vliv teplot v rozmezí 20 °C až 40 °C aplikovaných během prvních deseti hodin na beton třídy 30/37. Pevnost v tlaku v prvních třech dnech byla až dvojnásobná v případě 40 °C. Výsledná pevnost v tlaku po 28 dnech však již byla o 3 MPa nižší. Obecně lze říci, že v případě běžných konstrukčních betonů způsobí vyšší teplota ošetřování v počátku hydratace rychlejší nárůst mechanických vlastností, ale nižší konečné pevnosti [127]. Graybeal ve své práci [128] vyšetřoval vliv horké páry v prostředí s teplotou 95 °C na konečnou pevnost v tahu za ohybu a v tlaku, včetně modulu pružnosti v porovnání s hodnotami dosaženými na vzorcích ošetřovaných v běžných laboratorních podmínkách. Vzorky uložené po dobu 48 hodin v horké páře (90 °C a 95 % vlhkost) dosáhly o 19 % vyšší modul pružnosti ve srovnání se vzorky ošetřovanými při běžných laboratorních podmínkách (22 °C a 30 až 50 % vlhkosti). Velmi intenzivní byl rovněž nárůst pevnosti v tlaku.



Obrázek 12 Taylorův diagram: závislost C-S-H na poměru CaO/SiO₂ v odlišných teplotách [129].

Okrajové podmínky

Hydrotermální ošetřování v autoklávu umožňuje volit široké spektrum okrajových podmínek, které zásadně ovlivňují výsledné charakteristiky. Jedná se o teplotu a tlak v autoklávu, dále dobu trvání samotného procesu a především počátek působení hydrotermálních podmínek, jenž je určován od prvního kontaktu vody s cementem. Uvedené podmínky vychází z vlastností autoklávovaného kompozitu tak, aby nedošlo k jeho poškození vlivem zvýšené teploty či tlaku. Uvedený princip naznačuje **Obrázek 13**. Hydrotermální podmínky ošetřování lze využít pouze při výrobě prefabrikovaných dílců a prvků, neboť probíhá ve specializovaném zařízení a není možné jeho využití pro monolitické konstrukce.



Obrázek 13 Závislost užitečných vlastností na podmínkách v autoklávu [130].

2.5.1 Kompozity na bázi portlandského cementu v hydrotermálních podmínkách

V souvislosti se snahou o maximalizaci mechanických vlastností a zvýšení trvanlivosti vysokopevnostních jemnozrnných cementových kompozitů a jejich vhodnosti

pro prefabrikaci existují výzkumy zabývající se vlivem hydrotermálních podmínek ošetřování v autoklávu na vlastnosti vysokopevnostních a ultra-vysokopevnostních cementových kompozitů. Často používaným přístupem v rámci prováděných experimentálních analýz je porovnání standardních laboratorních podmínek, ošetřování ve vlhkém prostředí, ve vlhkém prostředí za zvýšených teplot do 100 °C, v prostředí nasyceném vodní párou za atmosférického tlaku a teplotách nad 100 °C a v neposlední řadě za podmínek kombinace zvýšeného tlaku a prostředí nasyceného vodní párou (hydrotermální podmínky). *Díky zvýšení teploty při počátečních fázích tuhnutí a tvrdnutí dochází k akceleraci kinetiky pucolánové reakce, kdy v rozmezí 200 °C až 250 °C dochází ke vzniku krystalického C-S-H (calcium silicate hydrates) [131]. Celý krystalizační proces značně ovlivňuje tlak vodních par [132], který může dosahovat v rámci průřezu betonového prvku odlišných hodnot. Proto je obtížné celý proces kontrolovat. Fontana et al. v [133] publikoval výzkum zaměřený na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti ultra-vysokopevnostního betonu ošetřovaného v autoklávu. Standardní ošetřování ve vodní lázni představovalo srovnávací hladinu. Dále proběhlo ošetřování horkou párou (90 °C, 150 °C a 200 °C) za atmosférického tlaku a dále autoklávování za dvou odlišných režimů (150 °C a 0,5 MPa, resp. 200 °C a 1,5 MPa). Jemné složky použitého kompozitu se skládaly z cementu CEM 42,5 R, jemného popílku a mikrosiliky. Pevnost v tlaku testovaná na vzorcích 40×40×160 mm dosažená referenčním způsobem ošetřování ve vodní lázni činila 85 MPa. Účinek autoklávování (200 °C a 1,5 MPa po dobu 8 hodin) se projevil zvýšením tlakové pevnosti o cca 85 % na hodnotu 157 MPa. Nárůst pevnosti v tahu za ohybu neodpovídal v této studii obvykle dosaženým a pozorovaným výsledkům, kdy dochází ke značnému nárůstu tahových charakteristik. Nárůst v tomto případě činil pouze 15 %. Při aplikaci ohřáté páry za atmosférického tlaku došlo dokonce k poklesu pevnosti v tahu za ohybu (cca 13 %) za současného nárůstu tlakové pevnosti. Mikrostruktura autoklávovaného cementového kompozitu a referenčních vzorků ošetřovaných ve vodní lázni má odlišný charakter. Hydrotermální ošetřování pozitivně ovlivní vnitřní strukturu směrem k její větší hutnosti a homogenitě. *Ve struktuře tvořené cementovou pastou se tvoří uzavřené sítě krystalických vláken s délkou větší než 1 μm a případné trhliny či póry vyplňují krystalické C-S-H vzniklé během hydrotermálního ošetřování [133]. O vznikajících krystalických formách C-S-H o délce přes 1 μm hovoří rovněž Shi et al. v [134]. Z hlediska hodnocení celkového objemu pórů pozorovali Fontana et al. [133] nárůst celkového objemu pórů, který však byl zároveň kompenzován významným poklesem velikosti těchto pórů. Krystalické C-S-H gely vznikající ve vnitřní struktuře studovaného HPC se vyznačují stabilnější strukturou než běžně identifikované amorfni fáze C-S-H gelů. V teplotním rozmezí 120 °C – 200 °C a odpovídajícím tlaku dochází v prostředí s nasycenou vodní parou k odlišnému průběhu jednotlivých fází hydratace portlandského cementu. Transformaci C-S-H gelu na C-S-H krystaly v průběhu hydratace portlandského cementu vlivem hydrotermálních podmínek ošetřování popsaly rovněž dřívější práce např. [135]. Kromě potvrzení nárůstu tlakové pevnosti autoklávovaných vzorků z UHPC o cca 35 % a zlepšení ohybových charakteristik potvrdil Esmaeili et al. v [136] výrazný pozitivní vliv na sorpční vlastnosti a transportní charakteristiky, které jsou úzce spojeny s charakterem pórového systému (velikost, celkový objem pórů, pórovitost a rovněž vzájemné provázání pórové struktury). Elrahman et al. v publikovaném příspěvku [137] přistoupil k ošetřování v autoklávu jiným způsobem. Většina ostatních publikovaných experimentálních programů je konstruována tak, že hydrotermální proces probíhá v určitém stáří kompozitu po stanovenou dobu bez přerušování a po uplynutí této doby je autoklávování ukončeno. Uvedený výzkum provedený Elrahmanem spočíval v provedení až 50 autoklávovacích cyklů. Z pohledu pevnosti v tlaku nastává nejzřetelnější nárůst po provedení 5 cyklů ošetřování v autoklávu, kdy finální pevnost dosahuje cca 130 % referenční úrovně dosažené při ošetřování v běžných laboratorních podmínkách. Elrahman et al. v [138] aplikoval hydrotermální podmínky**

(200 °C a 1,55 MPa) na UHPC kompozit pro výrobu nádrží pro uchování horké vody ze solárních ohřevů. Takto ošetřovaný kompozit se vyznačoval stabilními vlastnostmi z hlediska pevnosti a trvanlivosti.

2.5.2 Textilní beton v autoklávu

Z pohledu čistě mechanických vlastností provedl autor této disertační práce analýzu optimálního počátku hydrotermálního ošetřování a použitých hodnot tlaku a teploty aplikovaných na cementový kompozit pro výrobu textilního betonu [139]. V této práci byl vyšetřován optimální počátek aplikace hydrotermálních podmínek a vliv okrajových podmínek (teplota a tlak) v kontextu dosažení maximálních mechanických vlastností a využití potenciálu studovaného kompozitu. Optimální počátek aplikace 0,6 MPa a 165 °C (po dobu 4 hodin) byl stanoven jako 21 hodin od prvního kontaktu vody s cementem. Uvedené hydrotermální podmínky znamenají nárůst pevnosti v tlaku ze 115 MPa (pevnost po 28 dnech, ošetřování v laboratorních podmínkách, zkoušeno na vzorcích 40×40×160 mm) na 134 MPa. Nárůst tedy odpovídal cca 16 %. V rámci uvedeného programu proběhla rovněž analýza účinku hydrotermálního ošetřování. Zatímco při ošetřování v laboratorních podmínkách je dosažená tlaková pevnost nižší, po aplikaci výše uvedených hydrotermálních podmínek byly pozorovány vyšší hodnoty než v případě kompozitu bez vláken z vysokopevnostní oceli (108 MPa oproti 177 MPa). Provedený experimentální program [139, 140] rovněž potvrdil příznivý vliv autoklávování na pevnosti v tahu za ohybu – u kompozitu bez ocelových vláken došlo k nárůstu o 40 % (15,7 MPa versus 25,9 MPa), zatímco u kompozitu s ocelovými vlákny došlo k nárůstu o 30 % (34,1 MPa versus 48,4 MPa).

Autor předkládané disertační práce se rovněž zabýval hydrotermálním ošetřováním celých tenkostěnných desek zhotovených z textilního betonu za použití nekovové výztuže odlišného materiálu i vlastností (čedičová textilie, 2D sklotextilní výztuž a 3D sklotextilní výztuž) [141]. Tahové charakteristiky těchto desek (tloušťka 20 mm) určovaly především vlastnosti použité výztuže, kdy se účinek hydrotermálního ošetřování (0,45 MPa, 150 °C aplikované ve stáří 21 hodin) projevil nárůstem ohybové kapacity zkoušených desek o průměrných 10 %.

2.5.3 Pucolánově aktivní materiály v hydrotermálních podmínkách

Hydrotermální proces čili autoklávování představuje prověřenou modifikaci výroby stavebních materiálů s cementem obsahujících odpadní materiály jako popílek a struska [142]. S rozvojem využití křemičitých úletů spolu s útlumem těžkého průmyslu se z původně odpadních materiálů staly komerční suroviny s určitým finančním nákladem. Dle Klimesche přítomnost pucolánových materiálů (speciálně odpadu z pálených cihel, ang. *clay-brick waste*) výrazně zlepšuje formování tobermoritu (velikost krystalů 1,1 nm) [143]. Vzhledem k výraznému zrychlení pucolánové reakce popílku může autoklávování snížit potřebu vysokého obsahu cementu a mikrosiliky ve složení ultra-vysokopevnostního betonu (UHPC) [133]. Shatat ve své práci [144] vyšetřoval mechanické a základní charakteristiky cementových past s příměsí metakaolinu a křemičitého úletu v závislosti na délce vystavení vzorků účinkům hydrotermálních podmínek. Pasty zhotovené z čistého portlandského cementu vykazují lineární nárůst pevnosti v tlaku. Ostatní pasty (75 % cement + 25 % metakaolin; 20 % metakaolin + 5 % křemičitý úlet; 15 % metakaolin + 10 % křemičitý úlet) lze popsat výraznějším nárůstem pevnosti v tlaku, za podmínky ošetření v hydrotermálních podmínkách.

Arabi a Jauberhie ve své publikaci [145] studovali vliv různých hydrotermálních podmínek na vápenné malty s variantním podílem vysokopecní strusky. Hydrotermální proces trval

10 hodin, z čehož byly 2 hodiny nárůst teploty a tlaku, 6 hodin udržení konstantních definovaných podmínek a 2 hodiny pro snížení tlaku a teploty do úrovně laboratorních podmínek. Autoři vyšetřovali účinek tří různých nastavení podmínek v autoklávu – 176 °C a 1,0 MPa, 190 °C a 1,5 MPa, 204 °C a 1,8 MPa. S rostoucí teplotou a tlakem v autoklávu dochází ke zvýšení tlakové pevnosti. Absolutní hodnoty tlakových pevností klesají s rostoucí substitucí vápna vysokopecní struskou. Z hlediska poměru se však s rostoucím obsahem strusky uplatní efekt autoklávování (např. při 80% substituci odpovídá nárůst cca 50 %, zatímco v případě malty bez strusky je nárůst pouze cca 20 %). Snímky z elektronového mikroskopu ukazují výborně zformované krystaly tobermoritu v tvaru hustých propletených destiček a xenotlitu ve tvaru propletených jehlicových krystalů. Možností využít odpadní prach vznikající při produkci cementu v kombinaci s dalšími pucolánovými materiály a jejich chováním v hydrotermálních podmínkách se zabýval Amin et al. [143]. Působení 0,8 MPa a nasycené vodní páry probíhalo po dobu 30 min, 2, 6, 12 a 24 hodin. Různé poměry odpadního prachu z výroby cementu (*CKD – cement kiln dust*), elektrárenských kalů a křemičitých úletů byly míchány do kompozitu s vodním součinitelem 0,45. U všech sledovaných směsí docházelo k růstu pevnosti v tlaku vlivem autoklávování, a to až do délky trvání hydrotermálního procesu 18 hodin. *Hlavní důvod nárůstu pevnosti vysvětluje Amin hydrotermální interakcí mezi vápnem uvolněným z CKD a elektrárenským kalem za vzniku C-S-H, které významně přispívají k pevnosti autoklávovaných vzorků.* [143]. Shatat et al. v [144] kombinoval odpadní prach vzniklý při výrobě cementu (CKD) s metakaolinem v různém poměru a zkoumal různé podmínky ošetřování – při teplotách 40 °C, 80 °C, 120 °C a 140 °C za běžného tlaku a rovněž v hydrotermálních podmínkách po dobu od 2 hodin po 24 hodin. Z hlediska intenzity nárůstu tlakové pevnosti dochází k největšímu nárůstu při vystavení účinku hydrotermálních podmínek po dobu 6 hodin. Zde nastává změna trendu a rychlost nárůstu již není tak markantní, je uvažována doba působení hydrotermálních podmínek od 6 hodin po 24 hodin. Hodnotíme-li účinek zvýšených teplot za podmínek běžného atmosférického tlaku, dosahují nevyšší tlakové pevnosti vzorky ošetřované při 80 °C.

2.5.4 Hlinitanový cement v hydrotermálních podmínkách

Na základě studia dostupných zdrojů lze konstatovat, že problematika hydratace hlinitanových cementů v hydrotermálních podmínkách nepředstavuje téma širšího zájmu vědeckých výzkumných institucí. Vliv okrajových podmínek v teplotním rozmezí cca 5 °C až 60 °C popisuje mnoho prací, především v kontextu rizika konverze hydratačních produktů, poklesu pevnosti a ztráty soudržnosti. Palou et al. se ve své práci [145] zabýval studiem účinku autoklávování na vlastnosti žáruvzdorného cementového kompozitu s chemickou vazbou vznikající na základě reakce hlinitanového cementu a $(\text{NaPO}_3)_6$. Studovaný kompozit neodpovídal svým typem a složením žáruvzdorným materiálům s hydraulickou vazbou (žáruvzdorných betonů), vznikající vazba měla charakter chemicky vázaných kompozitů. Autoklávování proběhlo na vzorcích velikosti 40×40×160 mm po dobu 2 dnů a 7 dnů (220 °C a 2,0 MPa). *Z hlediska pevnosti v tlaku vykazují autoklávované vzorky výrazně nižších hodnot v porovnání se vzorky ošetřovanými v laboratorních podmínkách, jejich pevnost však výrazně roste s dobou trvání hydrotermálního procesu* [145]. V uvedeném experimentu nebyl hlavním cílem hydrotermálního ošetřování maximalizovat mechanické parametry, ale především zdokumentování odlišného průběhu chemické reakce s $(\text{NaPO}_3)_6$. C_3AH_6 se formuje v kubické formě jako produkt reakce C_3A v prostředí vařící vody, případně v prostředí saturované vodní párou [146].

KAPITOLA 3

METODOLOGIE A MATERIÁLY

Následující kapitola popisuje parametry, které byly vyšetřovány v rámci experimentální části disertační práce, a metodiku jejich stanovení. Dále je popsáno schéma provedení teplotního zatížení, kterým byl laboratorně simulován účinek vysokých teplot, včetně rychlosti nárůstu teploty a doby jeho trvání. Kapitola rovněž obsahuje popis průběhu hydrotermálního ošetřování včetně principu a popisu použitého přístroje – autoklávu. Závěrečná část se věnuje jednotlivým složkám cementového kompozitu použitého v rámci experimentálního programu popsaného dále v kapitole 4.

Jako základní zkušební těleso používané v rámci provedení experimentálního programu byl zvolen trámec velikosti 40×40×160 mm. Pro stanovení vyšetřovaných parametrů (objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, lomová energie a dynamický modul pružnosti) byly vždy použity minimálně tři samostatné zkušební vzorky a výsledná hodnota je pak uváděna jako průměr ze tří hodnot. Z důvodu analýzy uvedených parametrů v různých stupních teplotního zatížení bylo z jednotlivých směsí vyrobeno vždy více vzorků tak, aby byly k dispozici minimálně tři vzorky pro každou intenzitu teplotního zatížení.

3.1 METODY A VYŠETŘOVANÉ PARAMETRY

3.1.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena na vzorcích vysušených při 105 °C, případně na vzorcích po ukončení výpalu o příslušné maximální teplotě, tj. ve stavu, kdy z pórové struktury byla odstraněna volná voda a část fyzikálně vázané vody. Laboratorní váhy Kern 572 s maximálním rozsahem 4200 g a přesností 0,01 g sloužily k měření hmotnosti vzorků ve všech teplotních režimech. Vážení probíhalo za stejných teplotních podmínek (tj. po vyjmutí vzorku z pece, případně laboratorní sušárny), aby výsledek neovlivnila vzdušná vlhkost. Délku a šířku vzorku určovala ocelová forma (160 mm a 40 mm), měřena byla pouze výška vzorku, a to pomocí posuvného délkového měřidla Kinex s rozsahem měření 160 mm s přesností 0,01 mm. Měření probíhalo na třech různých místech vzorku a jako výsledná výška byl uvažován průměr ze tří naměřených hodnot. Výpočet objemové hmotnosti proběhl dle známého vztahu jako podíl hmotnosti a objemu.

3.1.2 Pevnost v tahu za ohybu

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu probíhalo v souladu s postupem popsáním v ČSN EN 196-1 [150]. Vzhledem k velikosti vzorků použitých v rámci experimentálního programu (40×40×160 mm) byla zkouška uspořádána jako tříbodový ohyb se světlým rozpětím podpor 100 mm. Vlastní ohyb probíhal za pomoci univerzálního zatěžovacího stroje MTS 100 s hydraulickým servosystémem pohonu. Pro řízení zkoušky včetně tvorby zatěžovacího schématu sloužil software TestWorks. Průběh zkoušky byl řízen přírůstkem deformace rychlostí 0,2 mm/min. Pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena na základě následujícího vztahu vycházejícího z rozměrů průřezu, osového rozpětí podpor a maximální dosažené síly při porušení (8).

$$f_t = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max,t} \cdot l}{h \cdot b^2} \quad (8)$$

- f_t ... pevnost v tahu za ohybu [MPa]
 $F_{max,t}$... maximální síla dosažená při porušení vzorku v průběhu ohybové zkoušky [N]
 l ... osová vzdálenost podpor [mm]
 h ... výška vzorku – měřeno ve směru hutnění [mm]
 b ... šířka vzorku [mm]

3.1.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla zjišťována na dvojici fragmentů zbylých po ohybové zkoušce za využití univerzálního zatěžovacího zařízení EU 40 a přípravku s definovanými zatěžovacími plochami 40×40 mm². Uvedený přístup je v souladu s postupem definovaným v normě ČSN EN 196-1 [150]. Samotná zkouška byla opět řízena přírůstkem deformace, jako v případě ohybové zkoušky. Výsledná pevnost v tlaku f_c byla vypočtena jako podíl maximální osové síly při porušení vzorku a ploše vymezené zkušební přípravkem (9). Plocha zkušební přípravku je stanovena na 40×40 mm². V případě, že výška vzorku dosahuje nižší hodnoty než 40 mm, použije se do výpočtu plochy skutečně změřená výška vzorku.

$$f_c = \frac{F_{max,c}}{A} \quad (9)$$

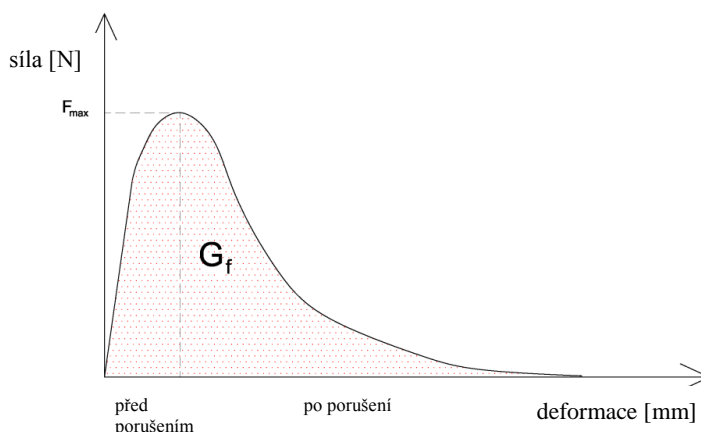
- f_c ... pevnost v tlaku [MPa]
 $F_{max,c}$... maximální síla dosažená při porušení vzorku v průběhu tlakové zkoušky [N]
 A ... zkušební plocha vymezená pro tlakovou zkoušku [mm²]

3.1.4 Lomová energie

Datový záznam zhotovený softwarem TestWorks z průběhu ohybové zkoušky provedené na zatěžovacím stroji MTS 100 umožnil zkonstruovat průběh závislosti působící síly a příslušné deformace, kterého bylo využito při stanovení lomové energie. Energii nutnou k přetržení vazeb v materiálu vztaženou na jednotku plochy nově vzniklé trhliny nazýváme lomovou energií G_f [J·m⁻²]. V těchto jednotkách je lomová energie běžně uváděna v literatuře, vyjádření v základních jednotkách soustavy SI je N·m⁻¹. V souladu s doporučením metodiky RILEM [151] lze lomovou energii definovat jako podíl plochy pod pracovním diagramem z ohybové zkoušky (**Obrázek 14**) a průřezu vzorku. Níže uvedený vztah (10) počítá s použitím vzorku s předem definovaným místem vzniku trhliny pomocí zářezu.

$$G_f = \frac{1}{a \cdot (b - n)} \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (10)$$

- G_f ... lomová energie [$J \cdot m^{-2}$]
 a ... šířka průřezu vzorku [mm]
 b ... výška průřezu vzorku [mm]
 n ... hloubka zářezu [mm]
 $F(\delta)$... průběh síly v závislosti na deformaci [N]
 δ_{max} ... maximální deformace (integrační mez) [mm]



Obrázek 14 Vyjádření lomové energie jako plochy pod pracovním diagramem z ohybové zkoušky.

Problematikou lomové energie kvazi-křehkých materiálů, mezi které řadíme i cementové kompozity, metodami její stanovení a podmínky ovlivňující výsledné hodnoty se zabývají výzkumné týmy po celém světě. Grassl et al. vyšetřoval vliv hloubky zářezu na lomovou energii betonu, včetně případu bez použití zářezu [152]. U trámů bez definovaného místa vzniku první trhliny pomocí zářezu platí, že čím je zkušební vzorek větší, tím rozsáhlejší je lomová plocha. Tzv. *size effect* ovlivňuje výslednou hodnotu lomové energie, kdy závisí jednak na velikosti zkušebního vzorku a rovněž na šířce a hloubce zářezu [153]. Vzhledem k využití ohybové zkoušky primárně pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a ve snaze zachytit vliv použitých vláken byla lomová energie v rámci provedeného experimentálního programu stanovena na vzorcích bez zářezu.

3.1.5 Dynamický modul pružnosti

Nedestruktivní metody tvoří nedílnou součást stavebního zkušebnictví, diagnostiky, defektoskopie a průzkumných prací. V materiálech obecně dochází k šíření mechanického vlnění, které lze charakterizovat např. rychlostí, jakou se impuls materiálem šíří. Aplikaci ultrazvukové pulsní metody pro účely stanovení dynamického modulu pružnosti (v tlaku a v tahu) popisuje norma ČSN 73 1371 [154]. Následující postupy a výpočty jsou převzaty z výše uvedené normy. Při samotné zkoušce zaznamenáváme rychlost šíření impulsu podélných ultrazvukových vln v betonu mezi dvěma body o známé vzdálenosti, pro které platí následující vztah (11):

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (11)$$

- v_L ... rychlost impulsu [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$]
 L ... délka měřicí základny [mm]
 T ... čas, který uplynul při průběhu impulsu měřicí základnou, vč. korekce
 t_{kor} ... korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu šíření impluzů, který se zjistí kalibrací přístroje

S rychlostí průchodu (šíření) ultrazvukového impulsu a hustotou materiálu souvisí dynamický modul pružnosti. Hodnotu dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo v tahu – E_{cu} lze na základě rychlosti průchodu ultrazvukových vln vzorkem stanovit pomocí následujícího vztahu:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (12)$$

- ρ ... objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 v_L ... impulzová rychlost podélného ultrazvukového vlnění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 k ... součinitel rozměrnosti prostředí [-]

Koeficient souměrnosti prostředí se používá v případě přepočtu stanovené rychlosti v dvojrozměrném a jednorozměrném prostředí. Hodnota těchto součinitelů je odvislá od dynamického Poissonova koeficientu zkoušeného materiálu. V případě uspořádání zkoušky prováděné v rámci experimentálního programu této disertační práce počítáme s trojrozměrným prostředím, pro které uvažujeme součinitel $k = 1$.

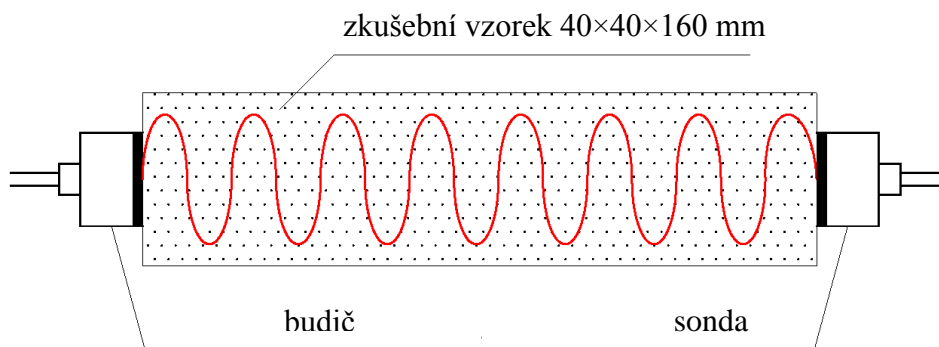
Výše popsaný vztah pro výpočet dynamického modulu pružnosti je uveden ve všeobecné udávané podobě, která vychází ze vztahu pro rychlost šíření podélných vln v tuhých látkách v neohrazeném prostředí.

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 - \nu_{cu}}{(1 + \nu_{cu}) \cdot (1 - 2 \cdot \nu_{cu})}} \quad (13)$$

- ν_{cu} ... Poissonovo číslo (Poissonův součinitel)

Zkouška pulsní ultrazvukovou metodou může mít různé uspořádání vyplývající z geometrie zkoušeného vzorku a vzájemné polohy sondy (zdroje ultrazvukového vlnění) a přijímače. Provedené měření odpovídalo přímému uspořádání, kdy sonda a přijímač jsou umístěny v jedné přímce a ultrazvuková vlna při zkoušení prochází po přímé linii. Schéma měření pomocí ultrazvukové pulsní metody znázorňuje **Obrázek 15**. Jako zdroj vlnění se používá krátký ultrazvukový impuls s frekvencí vyšší než 20 kHz. Přístroj PunditLab+ použitý v rámci experimentálního programu umožňuje měřit rychlost průchodu ultrazvukových vln, případně čas, za jaký ultrazvukové vlny vzorkem prošly.

Při měření je nutné nastavit dva základní parametry přístroje – sílu impulsu a velikost zesílení. Síla vyslaného impulsu závisí na nastavení budícího napětí zdroje ultrazvukového vlnění (125 V, 250 V, 350 V a 500 V). Velikost zesílení se naopak nastavuje na přijímači ultrazvukového vlnění, a to v intervalu $1\times$ až $1000\times$. Velikost obou výše uvedených parametrů závisí především na geometrickém uspořádání vzorku a na vlastnostech zkoušeného materiálu. Rovněž je rozdíl, zda provádíme měření na laboratorních vzorcích, či na celých konstrukčních prvcích v rámci měření in-situ. Při samotném měření je rovněž nutné zajistit kvalitní přenos ultrazvukového signálu mezi sondou a vzorkem a rovněž mezi vzorkem a přijímačem. V praxi používáme vrstvu lékařského sonogelu nanesenou mezi vzorek a plochu sondy, která se musí v průběhu měření pravidelně obnovovat.



Obrázek 15 Princip ultrazvukové pulsní metody.

3.1.1 Rtuťová porozimetrie

Součástí řešení experimentální části byla rovněž analýza pórové struktury studovaného kompozitu. Distribuci pórů ve vnitřní struktuře cementových kompozitů a jejich velikost lze stanovit za použití rtuťových, případně héliových porozimetrů. Porozimetr Thermo Pascal 140 byl použit v rámci řešení disertační práce. Princip spočívá ve vtláčování rtuti jakožto nesmáčivé kapaliny do vnitřní pórové struktury vzorku zkoumaného materiálu. Pro výpočet poloměru póru můžeme využít tzv. Washburnovu rovnici. Ta vyjadřuje rovnováhu mezi hydrostatickým tlakem kapaliny a povrchovým napětím. Průměr příslušného póru je nepřímo úměrný aplikovanému tlaku. Samotný přístroj pracuje na principu postupného zvyšování tlaku rtuti, která tak může vnikat do pórů menších a menších rozměrů. Danému tlaku rtuti tedy odpovídá přesné množství - objem pórů příslušného průměru, kterým aplikovaný tlak rtuti může pronikat. Minimální průměr póru, který je přístroj schopen zaznamenat, závisí na maximálním vyvoditelném tlaku rtuti. Maximální zaznamenaný průměr pórů je limitován hydrostatickým tlakem rtuti. Rtuť lze charakterizovat velikostí povrchového napětí ve výši $480 \text{ m}\cdot\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, zatímco úhel smáčení činí 130° . Z výše uvedených parametrů vyplývá měřitelné rozmezí pórů za použití rtuti o průměru od 3 nm do 100 μm . Rtuťová porozimetrie nemusí přinášet přesnou představu o velikosti jednotlivých pórů, které mohou mít nepravidelný tvar, případně tzv. krček, který má menší průměr než samotný pór. Rtuť při průchodu pórovým systémem musí projít přes krček do samotného póru, porozimetrem však může být zaznamenán krček jako pór. Ze známého působícího tlaku a k němu příslušnému objemu rtuti lze stanovit příslušný poloměr pórů dle následujícího vztahu (14):

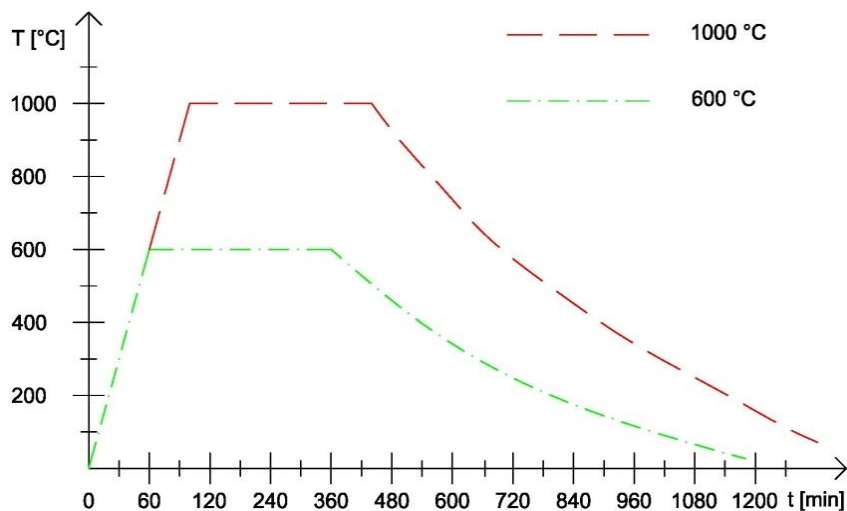
$$r = - \frac{(2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta)}{(g \cdot \rho \cdot h)} \quad (14)$$

- r ... poloměr kapiláry [m]
- γ ... povrchové napětí [$\text{m}\cdot\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
- Θ ... kontaktní úhel (úhel smáčení) mezi rtutí a pevným povrchem póru [$^\circ$]
- g ... tíhové zrychlení [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
- ρ ... hustota použité nesmáčivé kapaliny (v našem případě rtuti) [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
- h ... výška rtuti v kapiláře [mm]

3.2 TEPLOTNÍ ZATĚŽOVÁNÍ

Vzhledem k zaměření disertační práce na oblast vysokých teplot je nutné detailněji popsat samotný způsob laboratorní simulace teplotního zatěžování a rovněž technické prostředky

pro jeho provedení. Základní teplotní zatěžování proběhlo ve dvou úrovních, a to 600 °C a 1000 °C. V rámci detailnější analýzy vybraných směsí žáruvzdorného kompozitu proběhlo teplotní zatěžování ve více úrovních, které je však popsáno níže v příslušné kapitole. Účinek vysokých teplot byl laboratorně navozen v automatické elektrické peci Clasic Clare 4.0 dosahující maximální teploty 1100 °C. Ovládací systém pece umožňuje nastavit rychlost nárůstu teploty, dobu trvání teplotního zatížení a požadovanou teplotu. Všechny vzorky vkládané do pece absolvovaly vysoušecí proces po dobu 72 hodin při teplotě 105 °C. K tomuto řešení bylo přistoupeno z důvodu ochrany vnitřního zařízení pece (topné spirály, žáruvzdorný obklad, teplotní čidla atd.) před potenciálními nežádoucími účinky spojenými s uvolňováním vody obsažené v pórové struktuře. Při prvotních pokusech výpalu nevysušených vzorků docházelo k následné kondenzaci většího množství vody, kdy tento kondenzát představoval riziko pro elektrickou pec. Negativní projevy explosivního odprýskávání nebyly očekávány a ani zaznamenány. Jak bylo zmíněno výše, základní teplotní zatěžování proběhlo ve dvou úrovních, kdy referenční srovnávací úroveň představovaly vzorky pouze vysušené při 105 °C a dále již tepelně nezatížené. Požadované teploty bylo dosaženo rychlostí 10 °C/minutu. Výkonnostní charakteristika použité elektrické pece umožňovala plynulý nárůst teploty ve zvoleném nastavení. Po dosažení požadované teploty (600 °C, resp. 1000 °C) udržoval řídicí systém pece automaticky danou úroveň po 3 hodiny. Po uplynutí této doby řídicí systém automaticky vypnul zdroj tepelné energie a celá pec včetně zkoušených vzorků chladla až do teploty cca 50 °C, kdy bylo možné se vzorky bezpečně manipulovat. **Obrázek č. 16** schematicky ilustruje dva hlavní teplotní zatěžovací cykly. Sestupná část grafu znázorňuje přirozený proces chladnutí pece včetně jejího obsahu.

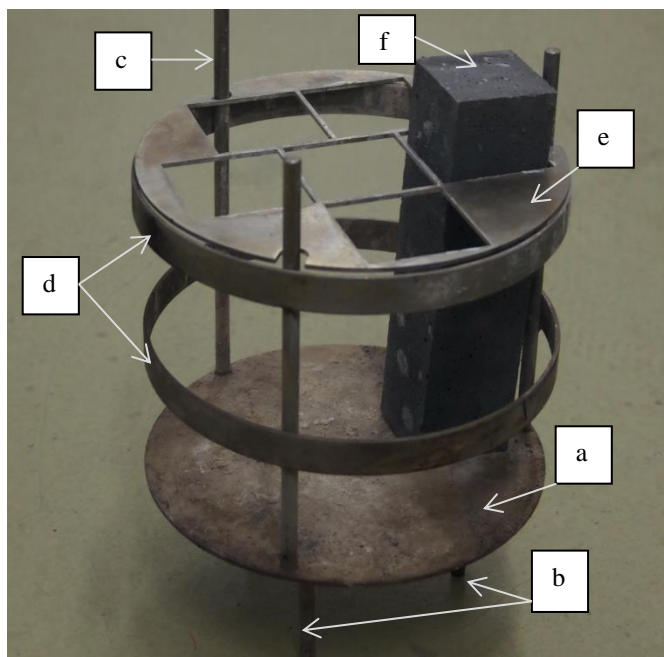


Obrázek 16 Schéma základního teplotního zatěžování (600 °C a 1000 °C).

3.3 HYDROTERMÁLNÍ OŠETŘOVÁNÍ

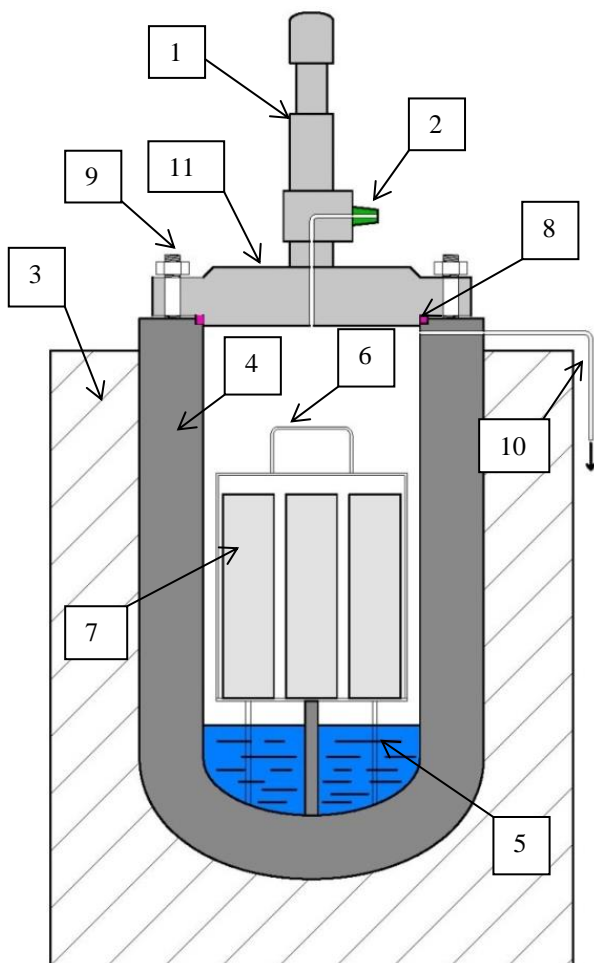
Hydrotermální ošetřování probíhalo v autoklávu ATH-70. Zjednodušeně řečeno se jedná o tlakovou nádobu s vodou a vzorky, která je hermeticky uzavřena s možností nastavení požadovaného tlaku, kterého je dosaženo zvýšením teploty. Vzorky jsou v tlakové komoře uloženy do nerezového držáku nad hladinou vody (viz **Obrázek 18**). Originální držák však svým konstrukčním uspořádáním, velikostí otvorů pro vzorky a dalšími parametry uživatelsky nevyhovoval. Z popsanych důvodů byl v rámci řešení disertační práce navrhnout nový

přípravek (**Obrázek 17**), který zohledňuje především praktický uživatelský přístup a zároveň umožňuje zkoušet i jiné vzorky než kvádry.

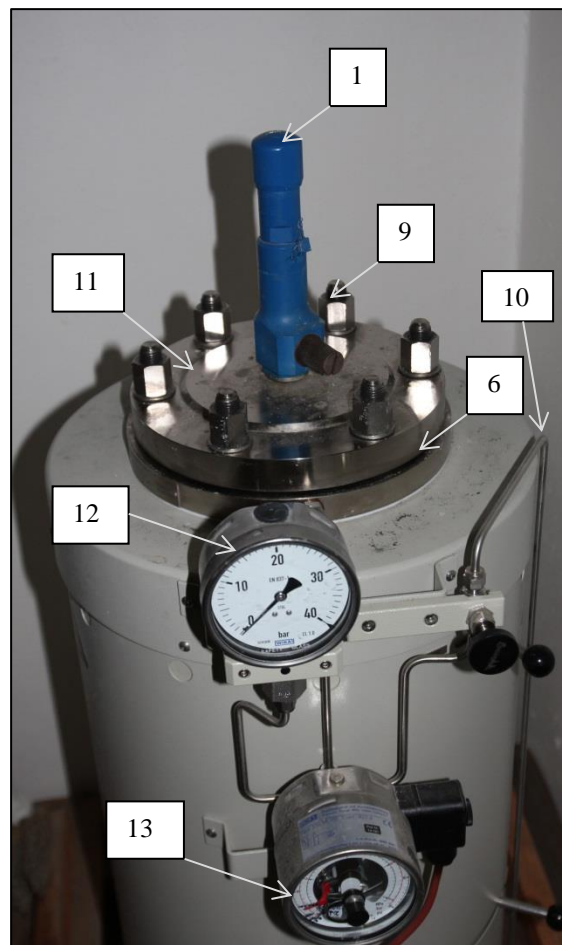


Obrázek 17 Přípravek pro autoklávování vzorků 40×40×160 mm, vyvinutý pro potřeby disertační práce.

Modifikovaný držák na vzorky byl vyhotoven rovněž z nerezové oceli tak, aby dlouhodobě snášel vlhké prostředí uvnitř tlakové komory autoklávu. Předchozí přípravek se skládal ze dvou pevných, vodorovných ocelových desek, ve kterých byly vyříznuty čtvercové otvory pro umístění zkoušených vzorků (standardní kvádry 40×40×160 mm). Princip nově navrženého přípravku spočíval v pevné kruhové podstavě (a), která je podpírána třemi tyčovými podporami (b) tak, aby kruhová podstava byla nad hladinou vody v autoklávu. Po obvodě kruhové podstavě jsou přivařeny tři pruty (c) průměru 6 mm, na které jsou při obvodu přivařeny dva kruhové prstence (d) ve výšce 50 mm a 120 mm nad podstavou. Původní pevné desky s otvory pro vzorky byly nahrazeny jednou odnímatelnou deskou (e), která leží na horním kruhovém prstenci. V této desce byly pomocí laseru vyříznuty otvory 45×45 mm pro uložení kvádrových vzorků ve vertikální rovině. Díky tomu lze vzorky (f) lépe vkládat do přípravku (především v případě hydrotermálního ošetřování čerstvých vzorků, které ještě nejsou dokonale vytvrzené). Výhodou nového uspořádání je snadná manipulace s čerstvými vzorky a jejich ukládání, dále pak možnost autoklávovat i jiné tvary vzorků než kvádry, a to za předpokladu použití desky s příslušným tvarem otvorů. Případně lze rovněž použít desku plnou, např. pro zkoušení krychlí o hraně 100 mm. Vyobrazení použitého autoklávu ATH-70 (typ 1.0230) znázorňuje **Obrázek 19**.



Obrázek 18 Schématický řez autoklávem.



Obrázek 19 Autokláv ATH-70 (JUMO GmbH&Co.)

Legenda:

- 1 ... pojistný ventil
- 3 ... tělo autoklávu
- 5 ... voda (cca 1,5 l)
- 7 ... zkoušené vzorky
- 9 ... uzavírací šrouby
- 11 ... víko autoklávu
- 13 ... manometr pro nastavení požadovaného tlaku

- 2 ... uzavíratelný ventil
- 4 ... tlaková komora autoklávu
- 6 ... nerezový stojan na vzorky
- 8 ... těsnění (fialová barva)
- 10 ... odvod páry
- 12 ... tlakoměr

3.3.1 Postup hydrotermálního ošetřování

Velikost tlakové nádoby (především její průměr) umožňuje uspořádání zkušebních vzorků tak, že lze současně hydrotermálně ošetřovat maximálně šest kvádrových vzorků o rozměrech 40×40×160 mm. Samotný hydrotermální proces včetně jeho přípravy lze popsat v následujících krocích.

- Změření rozměrů a hmotnosti zkoušených vzorků.
- Uložení vzorků do ocelového přípravku a jeho následné vložení do tlakové komory autoklávu. V tlakové komoře se nachází cca 1 litr vody. Použita je běžná voda z vodovodního řádu, neupravená.

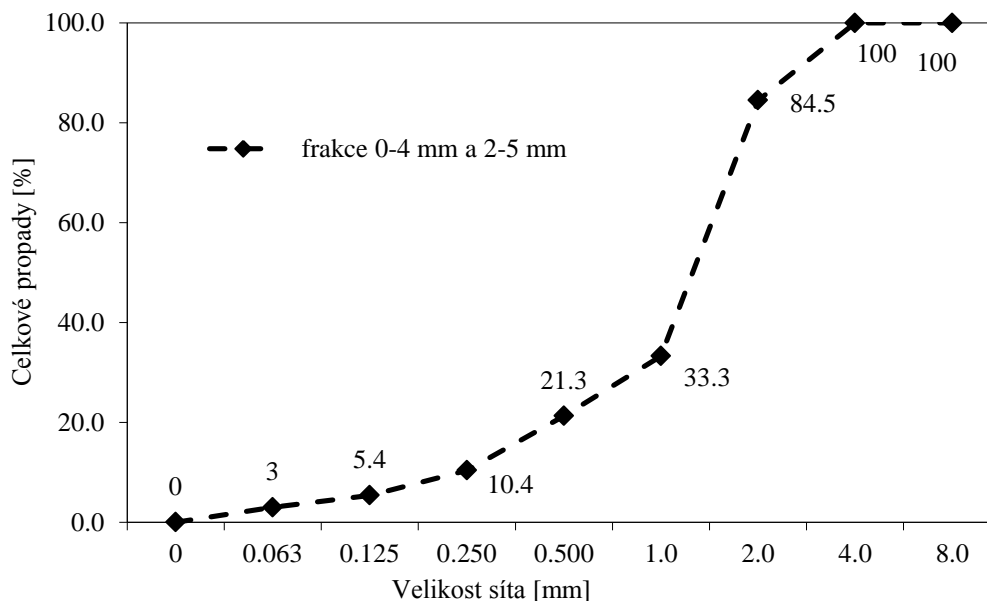
- Očištění styčné plochy a vložení speciálního těsnění mezi tlakovou komoru a masivní ocelové víko autoklávu.
- Uzavření tlakové komory víkem pomocí šesti šroubů a matic. Utažením šroubů dojde k hermetickému uzavření tlakové komory.
- Na manometru se nastaví požadovaný tlak a následuje zapnutí zdroje tepla, čímž se zvyšuje teplota vody v tlakové komoře.
- V okamžiku dosažení teploty 100 °C, kdy z tlakového ventilu uniká vodní pára, dojde k jeho uzavření, čímž v tlakové komoře roste tlak nad úroveň atmosférického tlaku až do okamžiku dosažení nastavené hodnoty tlaku.
- Po uplynutí požadovaného času je nutné manuálně vypnout zdroj tepla a zároveň zapnout větrací zařízení, díky kterému cirkuluje vzduch mezi tlakovou komorou a tělem autoklávu, čímž se urychlí proces ochlazování.
- Při poklesu teploty pod 100 °C dojde k uvolnění tlakového ventilu, čímž se vyrovná tlak uvnitř komory a v okolním prostředí.
- Po ochlazení na úroveň cca 50 °C je možné uvolnit šestici šroubů, odklopit víko a vyjmout vzorky.

3.4 POUŽITÉ MATERIÁLY

Následující část popisuje komponenty jako pojivo, plnivo, jemné podíly a vlákna, které se uplatnily ve vlákny vyztužených kompozitech použitých v experimentální části disertační práce, jež je popsána v kapitole 4.

3.4.1 Čedičové kamenivo

Jako plnivo ve všech vyšetřovaných směsích bylo použito přírodní drcené čedičové kamenivo z produkce společnosti Kámen Zbraslav, a.s. Zdrojem kameniva byl lom Dobkovičky, nacházející se v lokalitě obce Velemín v Ústeckém kraji. Celkové množství kameniva použitého ve všech dále popsáných směsích činilo 1100 kg·m⁻³. Vzhledem k tvaru použitého drceného kameniva a na základě zastoupení zrn kameniva daných velikosti (viz sítový rozbor dle ČSN [155] uvedený níže na **Obrázku č. 20**) bylo použito dvou frakcí 0-4 mm a 2-5 mm v poměru 80 % ku 20 % ve prospěch jemnější frakce. Sytná hmotnost použitého čedičového kameniva dosahovala 1690 kg·m⁻³, zatímco objemová hmotnost dosahovala 2965 kg·m⁻³.



Obrázek 20 Výsledek prosévací zkoušky použitého čedičového kameniva.

Vlastnosti kameniva, vzhledem k jeho vysokému zastoupení v cementových kompozitech (obvykle až 80 % objemu) [152], determinují charakter výsledného kompozitu. Přírodní kameniva představují vhodné plnivo do žárobetonů za předpokladu zohlednění jejich teplotního limitu, který se pohybuje v rozmezí 800 °C – 1000 °C. Kromě čediče jsou dalšími vhodnými horninami např. diabas či andezit. Použité čedičové kamenivo frakce 2-5 mm je uvedeno na následujícím **Obrázku č. 21**. Chemické složení uvádí **Tabulka 4**.



Obrázek 21 Použité čedičové kamenivo z lomu Dobkovičky frakce 2-5 mm.

3.4.2 Hlinitanový cement

Jako pojivo v rámci celého experimentálního programu sloužil hlinitanový cement Secar®71 z produkce společnosti Kerneos Inc. Vzorek použitého cementu zobrazuje **Obrázek 22**. Jak vyplývá z obchodního označení, obsah Al_2O_3 ve zmíněném cementu je cca 71 %, zatímco obsah oxidu vápenatého dosahuje cca 28 %. Detailnější chemické složení podle příslušného

technického listu uvádí **Tabulka 4**. Jemnost mletí použitého cementu dle Blainovy metody činí $381 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Podle informací výrobce dosahuje použitý cement objemové hmotnosti $2900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ až $3050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Na základě typu použitého plniva lze žárobetony zhotovené z cementu Secar®71 použít až do teplotního maxima $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ (jako plnivo je použit oxid hlinitý). Limit pro šamotové kamenivo je uváděn jako $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. V případě použití přírodního kameniva je dána celková odolnost výsledného kompozitu vlastnostmi kameniva, teplotní limit není dán vlastnostmi cementu.

Tabulka 4 Chemické složení použitého cementu, metakaolinu, cihelného prachu, keramických a čedičových vláken (% hmotnosti) [50, 156, 157].

Oxid	Kamenivo	Jemnozrné složky			Vlákna	
	Čedič (Dobkovičky)	Cement Secar®71	Metakaolin Mefisto L05	Cihelný prach Heluz	Izowat 12G keramická	Basaltex čedičová
Al ₂ O ₃	17,2	70,8	41,90	13,98	44,0	17,60
SiO ₂	41,9	0,58	52,90	64,45	53,7	54,39
K ₂ O	0,9	-	-	2,43	0,20	1,66
CaO	12,8	27,50	0,13	8,18	0,22	8,92
TiO ₂	-	0,37	1,80	0,77	0,60	1,12
Fe ₂ O ₃	11,0	0,42	1,08	5,39	0,66	9,77
SrO ₂	-	-	-	-	0,01	0,40
Na ₂ O	4,2	-	-	-	-	-
ZrO ₂	-	-	-	-	0,57	0,04
MgO	7,2	0,21	0,18	-	-	3,62
neidentifikováno	4,8	0,22	2,01	4,8	0,04	2,48

3.4.3 Metakaolin

Výroba metakaolinu probíhá řízenou kalcinací krystalického kaolinu jako výsledek ztráty krystalicky vázané vody. Teplota kalcinace závisí na složení vstupní suroviny. Obvykle dosahuje hodnoty $600 \text{ }^\circ\text{C}$ až $800 \text{ }^\circ\text{C}$ [158]. Pokračujícím ohřevem po proběhnutí kalcinace dojde k opětovné rekrystalizaci za současného poklesu reaktivity. Ve srovnání s kaolinem nabízí metakaolin vyšší reaktivitu a rovněž dobré vlastnosti pro využití jako minerální příměs [159]. Tento materiál se s výhodou používá jako příměs do různých kategorií betonu pro své pucolánové vlastnosti. Rovněž lze identifikovat jeho aplikaci pro žáruvzdorné cementové kompozity. Metakaolin Mefisto L05 použitý v experimentálním programu k disertační práci je z produkce Českých lupkových závodů, a. s. Vzorek použitého metakaolinu je vyobrazen na **Obrázku 22**. Příslušný technický list je součástí příloh k disertační práci. Dle chemického složení shrnutého v **Tabulce 4** v něm převažuje oxid křemičitý s $52,9 \%$, který následuje oxid hlinitý s $41,9 \%$.

3.4.4 Cihelný prach

Technologie výroby zdících materiálů v souladu s požadavky na tepelné izolační vlastnosti zdíva zahrnuje produkci přesných cihelných bloků s broušenými ložními plochami. Při procesu broušení vzniká jemnozrný odpadní produkt, jehož část se vrací do procesu výroby cihel. Zbývající část je odpadní produkt končící na skládce. Svoji barevností odpovídá vypálenému cihlářskému jílu, jak ilustruje **Obrázek 22**. Pucolánové vlastnosti cihelného

prachu potvrdila celá řada provedených výzkumných prací [160, 161]. Cihelný prach nachází své uplatnění např. při výrobě samozhutnitelných betonů jako mikroplnivo. Zároveň je třeba zmínit, že cihelný prach již prošel procesem výpalu při výrobě cihel, díky čemuž lze předpokládat vhodnost použití v oblasti žárobetonů [156]. Složení použitého cihelného prachu z produkce společnosti Heluz cihlářský průmysl uvádí **Tabulka 4**. Celkový obsah Al_2O_3 dosahuje 13,98 %, zatímco obsah SiO_2 činí 13,98 %. Jemnost mletí dle Blainovy metody činí $336 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Komponenty vhodné pro aplikaci v žáruvzdorných materiálech může limitovat obsah oxidu železitého (Fe_2O_3). Eze v [162] uvádí maximální doporučený obsah 4 % (vztaženo k hmotnostním procentům).



Obrázek 22 Zleva: cihelný prach, metakaolin Mefisto L05 a hlinitanový cement Secar®71.

3.4.5 Čedičová vlákna

V rámci provedeného experimentálního programu byla použita čedičová vlákna od distributora Basaltex s. r. o. Sortiment výrobce nabízí sekaná vlákna v násobcích palce o délce 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2 a 3,5. Jak vyplývá z **Tabulky 4**, obsah SiO_2 použitých vláken dosahoval 54 %, dle rozdělení z hlediska pH se jedná o kyselý čedič [77]. Z nabízeného sortimentu byla použita kombinace vláken délky 12,70 mm a 6,35 mm s převažujícím zastoupením delších vláken. Právě vlákna délky 12,7 mm zobrazuje fotografie na **Obrázku 23**. Dle technického listu výrobce dosahuje průměr vláken (rovingu) $13 \mu\text{m}$. Hustota materiálu vláken je $2900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Z mechanických parametrů je uváděn modul pružnosti o hodnotě 100 GPa a pevnost v tahu 300 MPa. Udávaná teplota tání použitých čedičových vláken je $1350 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obrázek 23 Čedičová vlákna 12,7 mm (vlevo) a keramická vlákna Izowat 12G (vpravo) použitá v experimentálním programu.

3.4.6 Keramická vlákna

Keramické materiály na bázi alumino-silikátů mají své průmyslové uplatnění v prostředí vysokých teplot. Z těchto keramických materiálů se vyrábí široký sortiment výrobků zahrnující především izolační vaty. Výrobce Izowat nabízí ve svém sortimentu rovněž granulovaná vlákna použitelná do teploty 1260 °C. Maximální teplota, které lze vlákna vystavit, koresponduje s obsahem SiO_2 , který výrobce garantuje pod 55 % (vztaženo k hmotnostním procentům). Jak uvádí **Tabulka 5**, použitá vlákna obsahovala 53,7 % SiO_2 a 44,0 % Al_2O_3 . Izowat 12G je, co se tvaru vláken týče, spíše granulovaná keramická vata. Hovoříme-li o materiálu Izowat 12G, máme na mysli keramická vlákna, přestože se o vlákna, tedy útvar vyznačující se ohebností a převažujícím délkovým rozměrem oproti jeho průřezu, v pravém smyslu nejedná. Literatura však v tomto případě používá termín keramická vlákna, a proto bude tato terminologie používána i v rámci disertační práce. Tvarově lze vlákna nejvíce připodobnit ke konglomerátu shluků o průměru v řádech desetin milimetrů až celých milimetrů, jak vyplývá rovněž z fotografie použitých vláken na **Obrázku 23**. V provedeném experimentálním programu bylo použito vláken Izowat 12G o objemové hmotnosti $200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Uvedená vlákna jsou granulovaná a nemají přesnou délku, výrobce však uvádí interval 5 až 15 mm. Průměr použitých vláken dosahuje 5 μm .

KAPITOLA 4

EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

4.1 ZÁKLADNÍ POPIS

Hlavní část této disertační práce spočívá v provedení laboratorních experimentů, jejich vyhodnocení a v diskuzi dosažených výsledků. V kontextu zadání a stanovených cílů disertační práce (viz kapitola 1.2 *Cíle disertační práce*) proběhla v rámci experimentální části analýza účinku teplotního zatížení na vybrané mechanické parametry cementových kompozitů určených pro aplikaci do prostředí s vysokými teplotami. Byl sledován vliv teplotního zatížení na objemovou hmotnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, lomovou energii a dynamický modul pružnosti. Vyjma deskových vzorků byly v celém experimentálním programu používány laboratorní vzorky o rozměrech 40×40×160 mm. Teplotní zatížení, simulované v laboratorní elektrické peci Clasic Clare 4.0, bylo zvoleno ve dvou základních úrovních, a to 600 °C a 1000 °C. Před samotným výpalem proběhl proces vysoušení při 105 °C. Jako hydraulické pojivo všech vyšetřovaných kompozitů v průběhu experimentálního programu sloužil hlinitanový cement Secar®71.

Úvodní část je věnována analýze vlivu vodního součinitele cementových past na základní a mechanické parametry před a po teplotním zatížení (600 °C a 1000 °C). Nejobsáhlejší část co do množství vyrobených a odzkoušených vzorků se zabývala vlivem širokého spektra parametrů (množství a typ vláken, množství a typ jemnozrné složky jakožto substituentu hlinitanového cementu) na mechanické parametry v různých úrovních teplotního zatížení (105 °C, 600 °C a 1000 °C). Bližší informace o použitých materiálech shrnuje kapitola 3. Byl sledován vliv substituce hlinitanového cementu metakaolinem či cihelným prachem. Na základě multikriteriálního hodnocení bylo vybráno celkem šest směsí, čtyři s čedičovými vlákny a dvě s keramickými vlákny, které byly podrobeny detailnějšímu teplotnímu zatížení od 100 °C po 1000 °C, odstupňovanému po 100 °C. Následně proběhlo vyhodnocení sledovaných parametrů. Rovněž byl sledován účinek vlivu vysokých teplot na nežáruvzdorné složky a jejich porovnání s žáruvzdornými. Pro pokračování experimentálního programu byly vybrány směsi s obsahem cihelného prachu. Vliv specifických podmínek ošetřování (hydrotermální podmínky) byl sledován na směsích s odlišným množstvím cihelného prachu, obsahujících čedičová či keramická vlákna. Závěr experimentálního programu obsahuje analýzu cyklického teplotního zatěžování vzorků tvaru desek zhotovených ze směsí s cihelným prachem a odlišného množství čedičových vláken. Vzhledem k tematickému

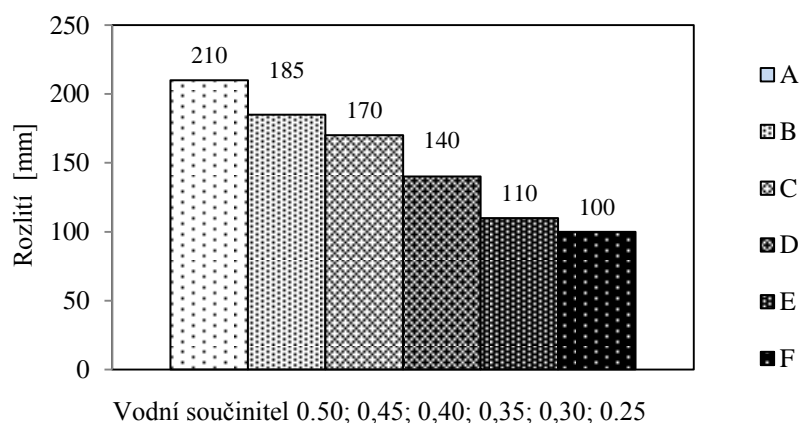
zaměření disertační práce na vláknové kompozity doplňují experimentální program snímky povrchu čedičových vláken z elektronového mikroskopu.

4.2 CEMENTOVÉ PASTY

Prvotní výzkum se týkal analýzy reologických a mechanických vlastností pojiva žáruvzdorných kompozitů s hydraulickou vazbou, tj. hlinitanového cementu Secar®71. Vlastnosti tohoto hydraulického pojiva jsou popsány v kapitole 2 a 3. Předmětem analýzy byly základní a mechanické vlastnosti včetně lomové energie. Z hlinitanového cementu byly zhotoveny pasty s odlišným vodním součinitelem, ze kterých byly následně vyrobeny standardní vzorky 40×40×160 mm. Hodnoty vodního součinitele jednotlivých směsí začínaly na 0,25 a byly odstupňovány po 0,05 až po maximální hodnotu 0,50. Po vyhotovení vzorků došlo k jejich odbednění ve stáří 24 hodin a po dobu následujících 23 dnů byly uloženy ve vlhkém prostředí s maximální teplotou 20 °C do stáří 28 dnů. Níže prezentované výsledky publikoval autor disertační práce v recenzovaných konferenčních příspěvcích – *Mechanical and Rheological Properties of Aluminous Cement under High Temperatures* (2014) [13] a *Binder for Refractory Composites – Hydration, Changing due to High Temperatures and Fracture energy* (2015) [163].

4.2.1 Zpracovatelnost

Reologické vlastnosti cementové pasty byly měřeny pomocí standardního rozlivového stolku běžně používaného pro stanovení konzistence malt dle normového postupu popsaného v ČSN EN 1015-3 [164]. Graf na **Obrázku 24** uvádí závislost rozlivu čerstvé cementové pasty na vodním součiniteli. V literatuře popsaná závislost mezi vodním součinitelem a zpracovatelností (hodnota rozlivu) se projevila i v případě past z hlinitanového cementu. Z uvedeného grafu vyplývá lineární závislost mezi vodním součinitelem a rozlitím cementových past. Zatímco pasta A s vodním součinitelem 0,50 vykazovala rozlití 210 mm, pasty E a F (vodní součinitel 0,30 a 0,25) byly již velmi tuhé a obtížně zpracovatelné, o čemž hovoří téměř nulové rozlití. V případě směsi F kužel s čerstvou pastou ani po patnácti úderech strásacího stolku nezměnil svůj tvar (100 mm je výchozí hodnota a zároveň průměr kužele).

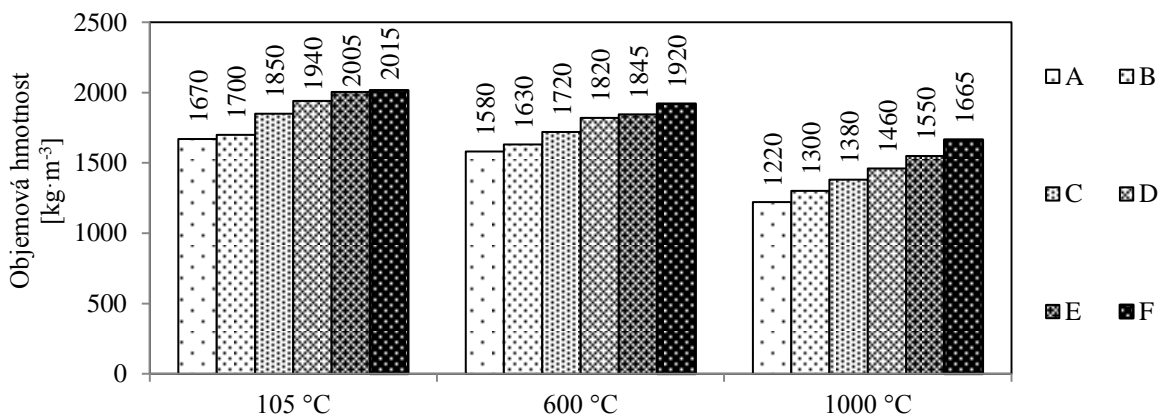


Obrázek 24 Zpracovatelnost čerstvých cementových past v závislosti na vodním součiniteli.

4.2.2 Objemová hmotnost

Rozdíl v hodnotě objemové hmotnosti mezi pastou A ($w/c = 0,50$) a pastou F ($w/c = 0,25$) v referenčních hodnotách činí 17 %, po výpalu na 600 °C pak necelých 18 %, zatímco

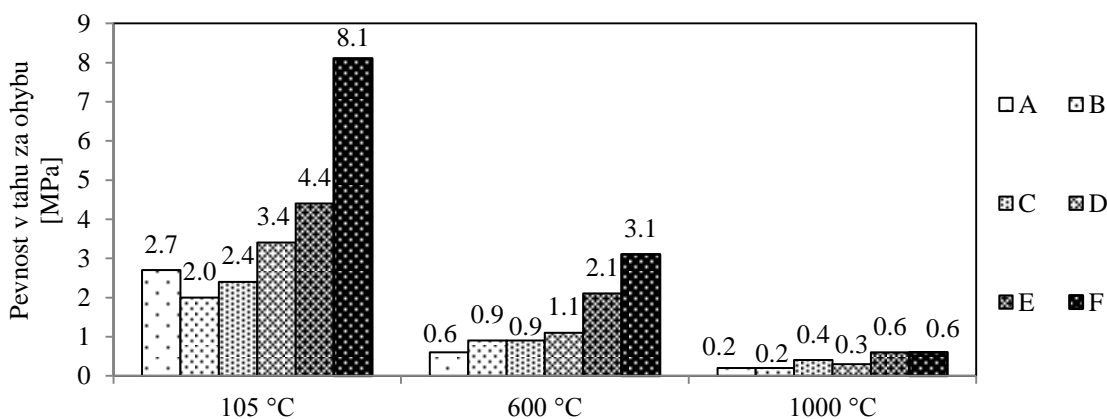
po výpalu při 1000 °C činí rozdíl již 27 %. Zajímavé porovnání nabízí procentuální vyjádření vlivu vodního součinitele na hodnoty objemové hmotnosti. Uvažujeme-li směs F ($w/c = 0,25$) za referenční úroveň, dochází k poklesu objemové hmotnosti v následujících úrovních – 99,5 % (pasta E), 96,3 % (pasta D), 91,8 % (pasta C), 84,3 % (pasta B) a 82,9 % (pasta A). V případě vzorků vypálených při 600 °C jsou hodnoty následující – 96,1 % (pasta A), 94,8 % (pasta B), 89,6 % (pasta C), 84,9 % (pasta B) a 82,3 % (pasta A); u vzorků vypálených při 1000 °C – 93,1 % (pasta E), 87,7 % (pasta D), 82,9 % (pasta C), 78,1 % (pasta B) a 73,3 % (pasta A). Celkové hodnoty objemových hmotností ve sledovaných teplotních režimech ilustruje **Obrázek 25**.



Obrázek 25 Vyhodnocení objemových hmotností cementových past v závislosti na vodním součiniteli.

4.2.3 Pevnost v tahu za ohybu

Z vyšetřovaných vlastností reaguje pevnost v tahu za ohybu nejcitlivěji na účinek vysokých teplot. Z prezentovaných hodnot, shrnutých v **Tabulce 5** a jejich grafického vyjádření na **Obrázku 26**, vyplývá závislost pevnosti v tahu za ohybu cementových past na účinku teplotního zatížení a na hodnotách vodního součinitele.



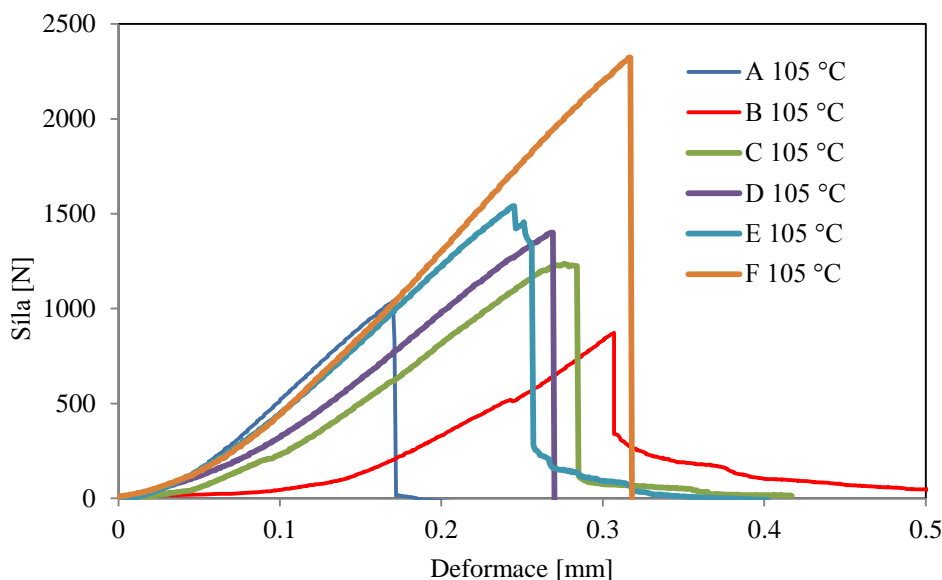
Obrázek 26 Vyhodnocení pevnosti v tlaku cementových past v závislosti na vodním součiniteli.

Účinek 600 °C se projevil poklesem pevnosti v tahu za ohybu přibližně na třetinu referenčních hodnot. Teplotní zatížení v úrovni 1000 °C znamená pokles popisované pevnosti cca na desetinnou úroveň. V absolutních hodnotách pevností v tahu za ohybu můžeme pozorovat vliv vodního součinitele, vyjma vzorků vypálených při 1000 °C. Můžeme identifikovat inverzní vztah mezi vodním součinitelem a dosaženými pevnostními charakteristikami, který rovněž platí pro reziduální pevnosti po výpalu při 600 °C. Účinek

600 °C se již projeví marginálními hodnotami pevností v tahu za ohybu nezávisle na hodnotách vodního součinitele.

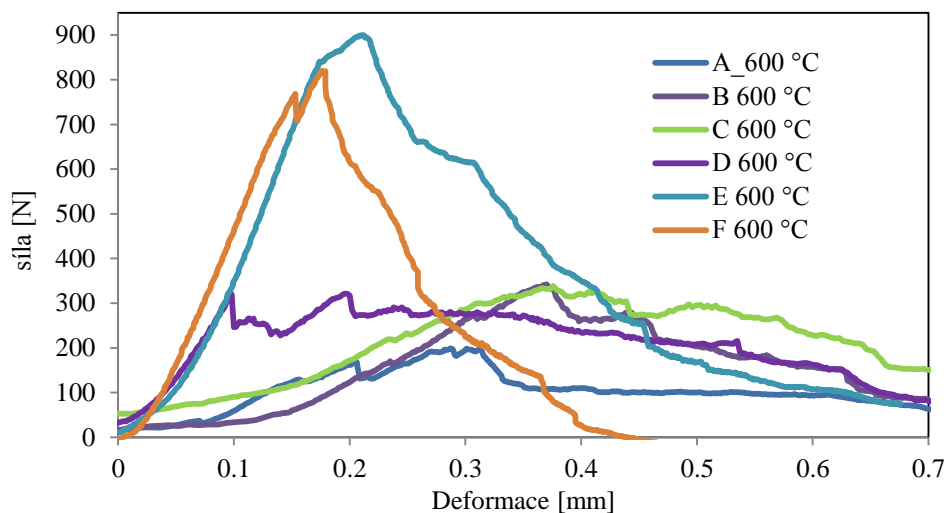
4.2.4 Lomová energie

Lomová energie je významně ovlivněna hodnotou vodního součinitele příslušné cementové pasty. Největších hodnot bylo dosaženo u cementové pasty s nejnižším vodním součinitelem. U vysušených vzorků dosahovala směs F ($w/c = 0,25$) cca 3× větší hodnotu lomové energie než směs A ($w/c = 0,50$). Za pozornost stojí fakt, že hodnoty lomových energií vzorků zatížených teplotou 600 °C dosahují velmi podobných hodnot. Zároveň je nutné zmínit, že u většiny past jsou dosažené hodnoty lomové energie nejvyšší právě v případě výpalu při 600 °C, zatímco druhé největší hodnoty byly naměřeny na vzorcích po výpalu na 1000 °C. Naopak vzorky bez teplotního výpalu, pouze vysušené, dosahovaly v převážné většině nejnižších hodnot lomové energie. Výše popsáný jev lze vysvětlit způsobem porušení kvádrových vzorků při ohybové zkoušce. Z grafu shrnujícího pracovní diagramy vysušených vzorků (**Obrázek 27**) můžeme vyčíst křehké porušení vzorku po dosažení maximální síly, odpovídající pevnosti v tahu za ohybu. Popisované pracovní diagramy neobsahují sestupnou větev, porušení vzorků odpovídá křehkému způsobu porušení.

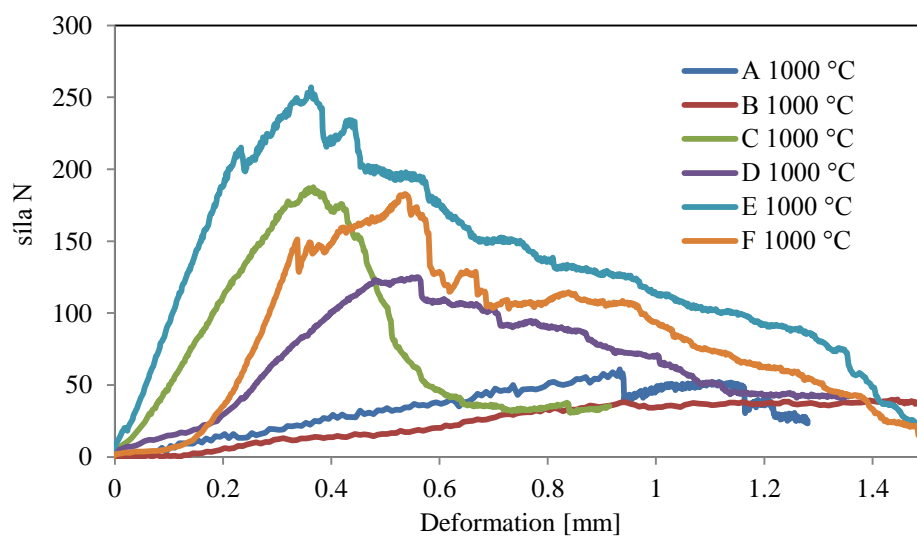


Obrázek 27 Pracovní diagramy vybraných cementových past po vysušení při 105 °C.

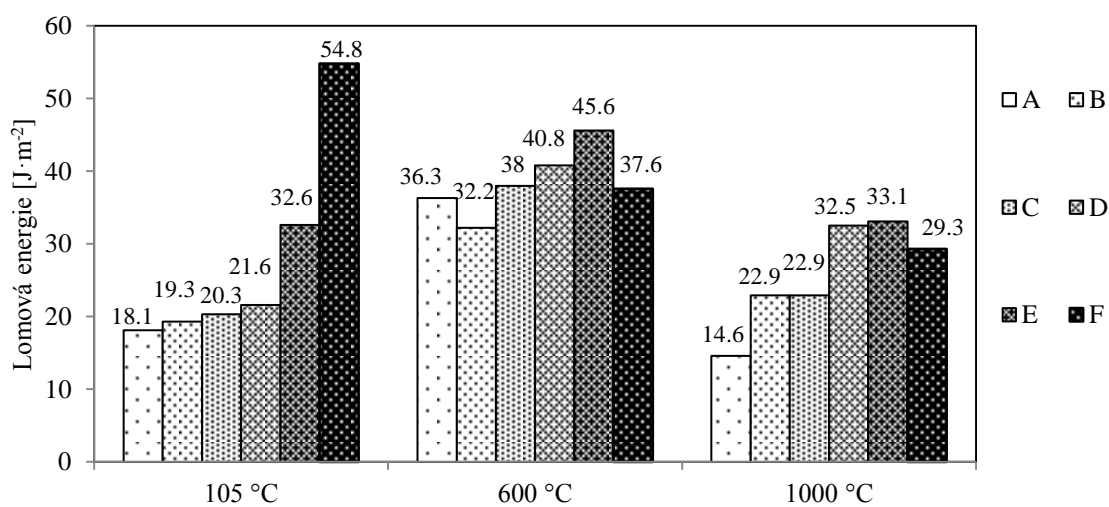
Naopak z pracovních diagramů cementových past vypálených při 600 °C (**Obrázek 28**), a obzvláště vypálených při 1000 °C (**Obrázek 29**) můžeme jasně identifikovat sestupnou větev, která má klesající charakter. Nedochází ovšem ke zpevnění (opětovnému růstu působící síly). Cementové pasty bez přítomnosti kameniva či vláken se stávají vlivem působení vysokých teplot více plastické a nedochází u nich ke křehkému porušení. Dosažené hodnoty lomových energií past z hlinitanového cementu graficky vyjadřuje **Obrázek 30**.



Obrázek 28 Pracovní diagramy vybraných cementových past po výpalu při 600 °C.



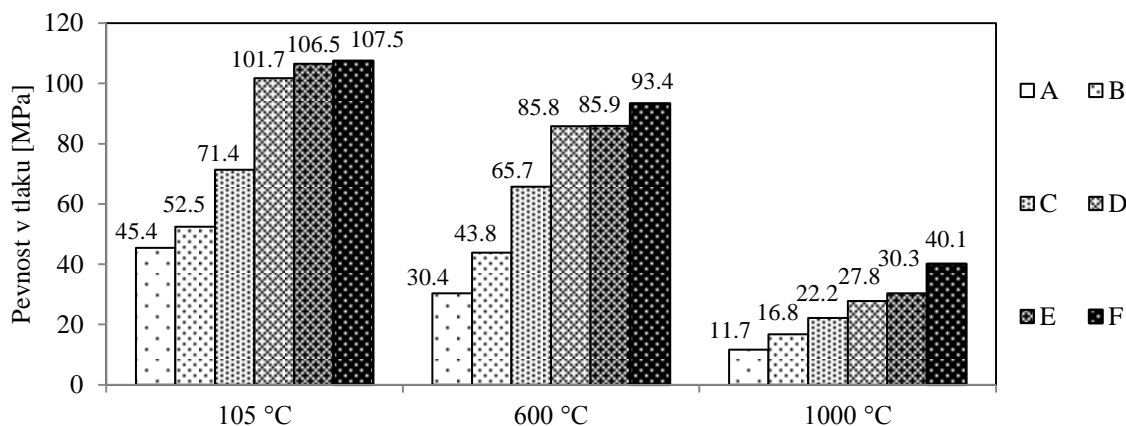
Obrázek 29 Pracovní diagramy vybraných cementových past po výpalu při 1000 °C.



Obrázek 30 Vyhodnocení lomových energií cementových past v závislosti na vodním součiniteli.

4.2.5 Pevnost v tlaku

Obecný princip nepřímé závislosti mezi vodním součinitelem a pevností v tlaku je dobře známý a popsán v literatuře. Základní předpoklad dosažení charakteristik vysokopevnostních cementových kompozitů spočívá mimo jiné ve snaze redukovat vodní součinitel [165]. Rozdíl v tlakové pevnosti mezi maximální (0,50) a minimální (0,25) použitou hodnotou vodního součinitele činil v případě vysušených vzorků cca 240 %, v případě výpalu při 600 °C cca 307 % a konečně vzorky vypálené při 1000 °C se lišily o cca 340 %. Lze tedy říci, že snížením vodního součinitele z 0,5 na 0,25 dojde ke zvýšení tlakové pevnosti cca třikrát, a to ve všech teplotních režimech. Pouze v referenční úrovni se hodnoty odpovídající vodnímu součiniteli 0,35 až 0,25 výrazně neliší (rozdíl pouze 5,8 MPa).



Obrázek 31 Vyhodnocení pevnosti v tlaku cementových past v závislosti na vodním součiniteli.

4.2.6 Dílčí závěr

Tabulka 5 shrnuje získané poznatky o objemové hmotnosti a mechanických parametrech past vyrobených z hlinitanového cementu o různých hodnotách vodního součinitele. Předmětné parametry byly vyšetřovány na vzorcích vystavených různým intenzitám teplotního zatížení (vysušení při 105 °C a teplotní zatížení v úrovni 600 °C a 1000 °C). Ze sledovaných hodnot vyplývá přímá závislost mezi vodním součinitelem a dosaženými mechanickými parametry, především pak jejich reziduálními hodnotami po výpalu. S klesající hodnotou vodního součinitele je dosaženo vyšších hodnot sledovaných parametrů. Ze záznamů z ohybových zkoušek je patrný rozdílný charakter porušení. Vzorky bez teplotního zatížení (pouze vysušené při 105 °C) vykazují křehký charakter porušení, nezávisle na vodním součiniteli. Výpal při 600 °C a především při 1000 °C má za následek velmi výrazné „změkčení“ materiálu, především u směsí s vyšším vodním součinitelem (směsi A, B, C a D). Sledovaný pokles mechanických parametrů odpovídal teoretickým předpokladům a úzce souvisel s rozkladem hydraulické vazby [13]. Z prezentovaných mechanických parametrů, především pak pevnosti v tahu za ohybu, vyplývá, že pro dosažení lepší odolnosti vůči účinkům teplotního zatížení je nutné použít vlákna, která by převzala tahová namáhání.

Tabulka 5 Vlastnosti a charakteristiky cementových past.

Pasta – označení	Vodní součinitel	Rozliti [mm]	Veličina	Teplota		
				105 °C		
A	0,50	210	objemová hmotnost ρ [kg·m ⁻³]	1670	1580	1220
			%	100	94,6	73,0
			pevnost v tlaku f_c [MPa]	45,4	30,4	11,7
			%	100	67,0	25,8
			pevnost v tahu za ohybu f_t [MPa]	2,7	0,6	0,2
			%	100	22,2	7,4
			lomová energie G_f [J·m ⁻²]	18,1	36,3	14,6
%	100	200,5	80,7			
B	0,45	185	objemová hmotnost ρ [kg·m ⁻³]	1700	1630	1300
			%	100	95,9	76,5
			pevnost v tlaku f_c [MPa]	52,5	43,8	16,8
			%	100	83,4	32,0
			pevnost v tahu za ohybu f_t [MPa]	2,0	0,9	0,2
			%	100	45,0	10,0
			lomová energie G_f [J·m ⁻²]	19,3	32,2	22,9
%	100	166,8	118,7			
C	0,40	170	objemová hmotnost ρ [kg·m ⁻³]	1850	1720	1380
			%	100	93,0	75,0
			pevnost v tlaku f_c [MPa]	71,4	65,7	22,2
			%	100	92,0	31,9
			pevnost v tahu za ohybu f_t [MPa]	2,4	0,9	0,4
			%	100	37,5	16,7
			lomová energie G_f [J·m ⁻²]	20,3	38,0	22,9
%	100	187,2	112,8			
D	0,35	140	objemová hmotnost ρ [kg·m ⁻³]	1940	1820	1460
			%	100	93,8	75,3
			pevnost v tlaku f_c [MPa]	101,7	85,8	27,8
			%	100	84,4	27,3
			pevnost v tahu za ohybu f_t [MPa]	3,4	1,1	0,3
			%	100	32,4	8,8
			lomová energie G_f [J·m ⁻²]	21,6	40,8	32,5
%	100	188,9	150,4			
E	0,30	110	objemová hmotnost ρ [kg·m ⁻³]	2005	1845	1550
			%	100	92,0	77,6
			pevnost v tlaku f_c [MPa]	106,5	85,9	30,3
			%	100	80,7	28,5
			pevnost v tahu za ohybu f_t [MPa]	4,4	2,1	0,6
			%	100	47,7	13,6
			lomová energie G_f [J·m ⁻²]	32,6	45,6	33,1
%	100	139,9	101,5			
F	0,25	100	objemová hmotnost ρ_m [kg·m ⁻³]	2015	1920	1665
			%	100	95,3	82,6
			pevnost v tlaku f_c [MPa]	107,5	93,4	40,1
			%	100	86,9	37,3
			pevnost v tahu za ohybu f_t [MPa]	8,1	3,1	0,6
			%	100	38,3	7,4
			lomová energie G_f [J·m ⁻²]	54,8	37,6	29,3
%	100	68,6	54,5			

4.3 ZÁKLADNÍ VÝZKUM

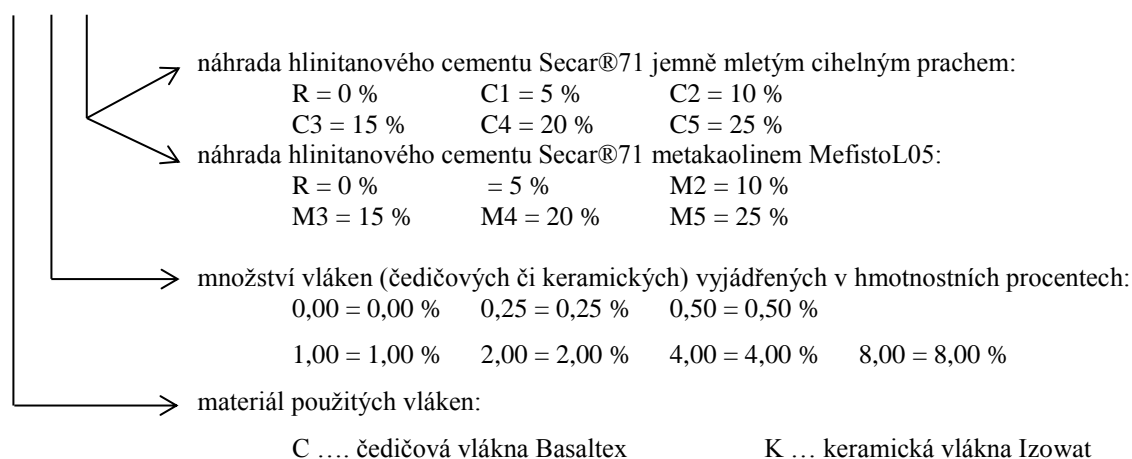
V rámci návaznosti na prvotní analýzu past z hlinitanového cementu s odlišným vodním součinitelem (viz kapitola 4.2) proběhlo rovněž zkoušení cementových past s odlišnou dávkou čedičových vláken. Dále byl sledován vliv plastifikační přísady v kombinaci uvedených složek, stále však bez plniva (čedičového kameniva). V případě cementových past bez plastifikační přísady byl s ohledem na zpracovatelnost čerstvé pasty použit vodní součinitel 0,35. Při aplikaci plastifikační přísady (SVC 1035) v množství 0,2 % hmotnosti cementu odpovídal vodní součinitel hodnotě 0,25. Popisované pasty (hlinitanový cement, voda, případně plastifikační přísada) byly doplněny odlišnými dávkami čedičových vláken (0,25 %; 0,5 %; 0,75 % 1,0 % a 1,5 % hmotnostních procent). Rovněž zde proběhlo již dříve popsané teplotní zatěžování v úrovních 105 °C, 600 °C a 1000 °C. Výsledky mechanických vlastností prezentoval autor disertace ve dvou publikacích [166, 167]. Zde je třeba poznamenat vysokou sensitivitu samotných cementových past, kdy i při aplikaci velmi malého množství plastifikační přísady dochází k rychlému ztekucení. Při následném uložení takto připravené směsi do formy nastává již v řádu minut segregace pojiva a vody. V případě doplnění směsi o vlákna (v našem případě čedičová) lze již vytvořit čerstvou směs, kterou lze uložit do formy, aniž by došlo k oddělení kapalných a pevných složek. Tlaková pevnost cementových past obsahujících čedičová vlákna dosahovala nižších hodnot (o cca 10%) oproti cementovým pastám s odpovídajícím vodním součinitelem bez vláken popsaným v kapitole 4.2. V absolutních hodnotách tlakových pevností bylo možné pozorovat mírně klesající trend v závislosti na rostoucím objemu vláken. Naopak očekávaný pozitivní vliv vláken se projevil v hodnotách tahových charakteristik (pevnost v tahu za ohybu). Při použití vláken došlo k nárůstu tahové pevnosti o 50 %, 60 % resp. 85 % (vztaženo k účinku 105 °C, 600 °C a 1000 °C). V případě cementové pasty s vodním součinitelem 0,35 (bez plastifikační přísady) byl znatelný trend nárůstu pevnosti v tahu za ohybu s rostoucím zastoupením vláken. Naopak pasty s plastifikační přísadou (vodní součinitel s hodnotou 0,25) lze charakterizovat téměř identickými hodnotami pevnosti v tahu za ohybu (rozdíl max. 0,4 MPa resp. 3%) jak v případě referenčních vzorků, tak v případě vzorků zatížených výpalem. Jako ilustrativní příklad je možno uvést pevnosti v tahu za ohybu po výpalu na 1000 °C, kdy pasty s vodním součinitelem 0,25 bez vláken dosáhly 0,6 MPa, zatímco pasty s čedičovými vlákny a plastifikační přísadou dosáhly pevnosti 4,5 MPa. V rámci přípravných experimentů, vzhledem k předpokladu v použití jemných složek s pucolánovými vlastnostmi (metakaolin a cihelný prach), byly provedeny rovněž zkoušky vzorků zhotovených z cementových past obsahujících čedičová vlákna a metakaolin či cihelný prach do 20 % hmotnosti cementu. Výsledky těchto prací byly publikovány autorem v konferenčním příspěvku [168].

Po provedení prvotních experimentů zahrnujících analýzu reologických a mechanických vlastností cementových past byl následující výzkum zaměřen již na plnohodnotný kompozit obsahující plnivo, pojivo, vlákna a další nezbytné složky. Při základním návrhu složení cementové směsi, především kombinace jednotlivých frakcí kameniva z hlediska velikosti a množství, dávky jemných složek – cementu a mikroplniva - a výsledného vodního součinitele, sloužily jako východisko předchozí zkušenosti v oblasti výzkumu cementových kompozitů – především kategorie HPC či UHPC s přihlédnutím ke specifickým kladeným na oblast aplikace do prostředí vysokých teplot. Již při samotném návrhu bylo uvažováno s variabilním rozšířením experimentálního programu o různé dávky vláken a jemných podílů ve více materiálových variantách.

4.3.1 Jednotlivé směsi

Pro plnohodnotný cementový kompozit s přírodním kamenivem byly využity komponenty popsané v kapitole 3. Množství čedičového kameniva bylo ve všech studovaných směsích stejné – $1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Základní množství hlinitanového cementu – $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ bylo postupně substituováno metakaolinem či cihelným prachem do maximálně 25% hmotnosti. Další parametr odlišující jednotlivé směsi je materiál vláken – čedičová a keramická. Čedičová vlákna byla použita v délkách 6,35 mm a 12,7 mm v konstantním poměru 1:9. Čedičová vlákna byla použita v množství odpovídajícím 0,25 %, 0,5 %, 1,0 %, 2,0 % a 4,0 % (vztaženo k objemu), zatímco keramická vlákna byla použita v množství 0,25 %, 4,0 % a 8,0 %. Složení použitého žáruvzdorného kompozitu uvádí **Tabulka 6** (kompozit s čedičovými vlákny) a **Tabulka 7** (kompozit s keramickými vlákny). Pro systematický popis a označení jednotlivých směsí slouží následující schéma. Popisek poskytuje informaci o typu použitých vláken (C × K), množství příslušných vláken (od 0 % po 8 %) a dále informaci o typu a množství substituentu hlinitanového cementu (C × M).

a_b_c



Tabulka 6 Složení a popis jednotlivých směsí s čedičovými vlákny.

Označení	Složky směsi kompozitního materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]							
	Tekuté složky		Čedičové kamenivo		Čedičová vlákna		Jemné podíly	
	Plastifikátor	Voda	0-4 mm	2-5 mm	6,35 mm	12,7 mm	Hlinitanový cement	Cihelný prach/metakaolin
Referenční směs bez vláken								
C_0,0_R	22,75	224	880	220	0	0	900	0
C_0,0_*1	22,75	224	880	220	0	0	855	45
C_0,0_*2	22,75	224	880	220	0	0	810	90
C_0,0_*3	22,75	224	880	220	0	0	765	135
C_0,0_*4	22,75	224	880	220	0	0	720	180
C_0,0_*5	22,75	224	880	220	0	0	675	225
0,25 % čedičových vláken								
C_0,25_R	22,75	224	880	220	0,73	6,52	900	0
C_0,25_*1	22,75	224	880	220	0,73	6,52	855	45
C_0,25_*2	22,75	224	880	220	0,73	6,52	810	90
C_0,25_*3	22,75	224	880	220	0,73	6,52	765	135

C_0,25_*4	22,75	224	880	220	0,73	6,52	720	180
C_0,25_*5	22,75	224	880	220	0,73	6,52	675	225
0,50 % čedičových vláken								
C_0,5_R	22,75	224	880	220	1,45	13,05	900	0
C_0,5_*1	22,75	224	880	220	1,45	13,05	855	45
C_0,5_*2	22,75	224	880	220	1,45	13,05	810	90
C_0,5_*3	22,75	224	880	220	1,45	13,05	765	135
C_0,5_*4	22,75	224	880	220	1,45	13,05	720	180
C_0,5_*5	22,75	224	880	220	1,45	13,05	675	225
1,00 % čedičových vláken								
C_1,0_R	22,75	224	880	220	2,9	26,1	900	0
C_1,0_*1	22,75	224	880	220	2,9	26,1	855	45
C_1,0_*2	22,75	224	880	220	2,9	26,1	810	90
C_1,0_*3	22,75	224	880	220	2,9	26,1	765	135
C_1,0_*4	22,75	224	880	220	2,9	26,1	720	180
C_1,0_*5	22,75	224	880	220	2,9	26,1	675	225
2,00 % čedičových vláken								
C_2,0_Ref	22,75	224	880	220	5,8	52,2	900	0
C_2,0_*1	22,75	224	880	220	5,8	52,2	855	45
C_2,0_*2	22,75	224	880	220	5,8	52,2	810	90
C_2,0_*3	22,75	224	880	220	5,8	52,2	765	135
C_2,0_*4	22,75	224	880	220	5,8	52,2	720	180
C_2,0_*5	22,75	224	880	220	5,8	52,2	675	225
4,00 % čedičových vláken								
C_4,0_R	22,75	224	880	220	11,6	104,4	900	0
C_4,0_*1	22,75	224	880	220	11,6	104,4	855	45
C_4,0_*2	22,75	224	880	220	11,6	104,4	810	90
C_4,0_*3	22,75	224	880	220	11,6	104,4	765	135
C_4,0_*4	22,75	224	880	220	11,6	104,4	720	180
C_4,0_*5	22,75	224	880	220	11,6	104,4	675	225

* označuje písmeno „C“ pro směsi s cihelným prachem, případně písmeno „M“ pro směsi s metakaolinem.

Tabulka 7 Složení a popis jednotlivých směsí s keramickými vlákny.

Označení	Složky směsi kompozitního materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]						
	Tekuté složky		Čedičové kamenivo		Keramická vlákna	Jemné podíly	
	Plastifikátor	Voda	0-4 mm	2-5 mm	Izowat 12G	Hlinitanový cement	Cihelný prach/metakaolin
0,25 % keramických vláken							
K_0,25_Ref	22,75	224	880	220	5	900	0
K_0,25_*1	22,75	224	880	220	5	855	45
K_0,25_*2	22,75	224	880	220	5	810	90
K_0,25_*3	22,75	224	880	220	5	765	135
K_0,25_*4	22,75	224	880	220	5	720	180

K_0,25_*5	22,75	224	880	220	5	675	225
4,0 % keramických vláken							
K_2,0_R	22,75	224	880	220	80	900	0
K_2,0_*1	22,75	224	880	220	80	855	45
K_2,0_*2	22,75	224	880	220	80	810	90
K_2,0_*3	22,75	224	880	220	80	765	135
K_2,0_*4	22,75	224	880	220	80	720	180
K_2,0_*5	22,75	224	880	220	80	675	225
8,0 % keramických vláken							
K_4,0_R	22,75	224	880	220	160	900	0
K_4,0_*1	22,75	224	880	220	160	855	45
K_4,0_*2	22,75	224	880	220	160	810	90
K_4,0_*3	22,75	224	880	220	160	765	135
K_4,0_*4	22,75	224	880	220	160	720	180
K_4,0_*5	22,75	224	880	220	160	675	225

* označuje písmeno „C“ pro směsi s cihelným prachem, případně písmeno „M“ pro směsi s metakaolinem.

4.3.2 Proces míchání a ošetřování

Proces homogenizace čerstvé směsi cementových kompozitů s hydraulickou vazbou vyztužených vláken je v principu obdobný s výrobou vysokopevnostních cementových kompozitů typu HPC (high performance concrete), UHPC (ultra-high performance concrete) či UHPFRC (ultra-high performance fibre-reinforced concrete). Pro míchací proces moderních vysokopevnostních kompozitů existuje široká řada studií, definující přesnou časovou souslednost jednotlivých kroků, rychlost a dobu homogenizace, čas pro přidání vody, plastifikačních a jiných přísad, způsob přidání vláken atd. [169]. Přesně daná časová souslednost jednotlivých kroků a časové vymezení příslušných fází homogenizačního a míchacího procesu charakterizuje vlákny vyztužený kompozit pro vysokoteplotní aplikace, řešený v rámci disertační práce.

Proces míchání čerstvé směsi probíhal v laboratorním horizontálním míchacím zařízení typu Controls Automix, případně Spar Mixer SP-100/100D. Na základě prvotních experimentů se jako nejvýhodnější osvědčil postup vzájemné homogenizace obou použitých frakcí čedičového kameniva (0-4 mm a 2-5 mm) po dobu dvou minut. Po přidání jemných složek (hlinitanový cement s příslušnou substitucí metakaolinem či cihelným prachem) následovala druhá fáze homogenizace po dobu 3 minut. Po jejím ukončení byly všechny suché složky již dostatečně vzájemně promíseny. Po uplynutí 5 minut byly přidány tekuté složky. Z celkového objemu vody bylo odděleno cca 80 % a v tomto objemu byla rozmíchána celá dávka super plastifikační přísady Sika ViskoCrete 1035. Následoval další proces míchání po dobu 3 minut, na jehož konci došlo k přidání vláken a zbytku vody. Všechny složky se poté homogenizovaly 2 minuty.

Čerstvá směs byla následně uložena do ocelových forem (viz **Obrázek 32**) a v případě nutnosti vibrována (platí pro vyšší dávky čedičových vláken nad 2 % a keramických v množství 8 %) a její povrch byl přikryt polyethylenovou fólií pro zabránění vypařování záměsové vody. Skladování probíhalo v běžných laboratorních podmínkách. Po uplynutí 72 hodin došlo k vyjmutí vzorků z forem a jejich následnému uložení do prostředí s vysokou relativní vlhkostí (21 °C a rh = 80 %) až do stáří 28 dnů, kdy započalo vysoušení a teplotní zatěžování, jak znázorňuje **Obrázek 33**.



Obrázek 32 Ukládání čerstvé směsi obsahující keramická vlákna Izowat 12G a metakaolin.



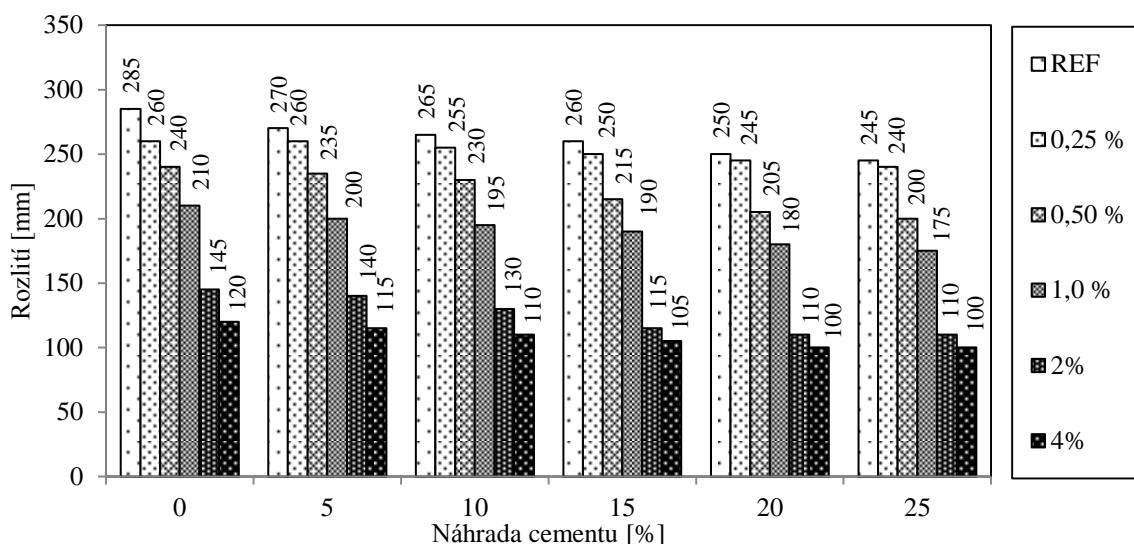
Obrázek 33 Uchování vzorků s různou příměsí metakaolinu a cihelného prachu v uzavřeném boxu s vysokou relativní vlhkostí.

4.3.3 Reologické vlastnosti

Vzhledem k charakteru směsi, maximální velikosti zrna kameniva 5 mm a dalším parametrům nebylo pro vyhodnocení zpracovatelnosti použito standardních metod pro běžné betony, ale opět rozlivového stolku pro hodnocení zpracovatelnosti např. čerstvých malt.

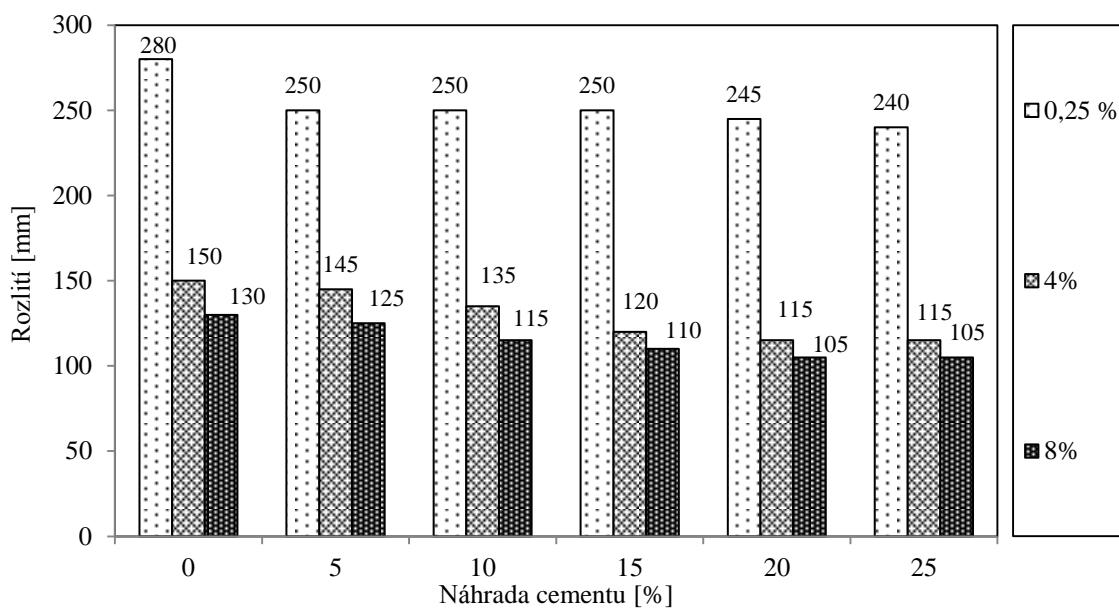
Již při návrhu složení byla směs formulována jako kompozit se samozhutnitelnými vlastnostmi, případně nízkými nároky na hutnění čerstvé směsi. Vzhledem k množství variovaných parametrů v rámci složení studovaného kompozitu (množství a typ vláken, zastoupení cihelného prachu a metakaolinu) bylo zřejmé, že se zpracovatelnost jednotlivých směsí bude lišit. Byl předpoklad, že zpracovatelnost se bude pohybovat tekutých směsí až po směsi zpracovatelné výhradně kombinací vibrování a lisování. Dva parametry, které vzájemně odlišovaly jednotlivé směsi, určují zásadním způsobem zpracovatelnost čerstvé směsi. Jedná se o částečnou substituci hlinitanového cementu metakaolinem či cihelným prachem a dále postupné navyšování zastoupení čedičových či keramických vláken. Největší rozliv byl zaznamenán u směsi bez vláken a bez obsahu metakaolinu či cihelného prachu, což bylo predikovatelné. Zpracovatelnost se zhoršuje (vyjádřeno hodnotou rozliti) s rostoucím obsahem vláken. V rámci stejného množství vláken ve směsi klesá zpracovatelnost s větší substitucí hlinitanového cementu metakaolinem či cihelným prachem.

Vyšší dávka čedičových vláken nad 1 % (vztaženo k objemu) znamená změnu konzistence a nutnost použít vibrační prostředky při ukládání čerstvé směsi do forem.



Obrázek 34 Zpracovatelnost čerstvých směsí s čedičovými vlákny a cihelným prachem.

Jednotlivé hodnoty rozliti referenční směsi bez vláken a dále směsí s obsahem 0,25 % až 4,0 % čedičových vláken jsou graficky znázorněny na **Obrázku 34**. Tentýž graf znázorňuje na vodorovné ose také vliv substituce hlinitanového cementu. Obdobnou situaci pro směsi s keramickými vlákny uvádí graf na **Obrázku 35**. Uvedené grafické vyjádření se týká průměrných hodnot naměřených na čerstvých směsích s metakaolinem i cihelným prachem. Rozliti jednotlivých směsí lišících se pouze typem substituentu (metakaolin či cihelný prach) vykazovalo téměř totožné hodnoty (v rámci tolerance měřených jednotek – tedy s přesností 5 mm), proto není v **Obrázku 34** a **35** rozlišeno zvlášť rozliti směsí s metakaolinem a zvlášť s cihelným prachem.



Obrázek 35 Zpracovatelnost čerstvých směsí s keramickými vlákny

4.3.4 Dosažené výsledky

Následující kapitoly prezentují výsledky dosažené na vzorcích vysušených při 105 °C a vypálených při 600 °C a 1000 °C dle metodiky popsané v kapitole 3.2. Vzhledem k rozsáhlejšímu souboru dat získaných v rámci řešení předchozí experimentální části je vyhodnocení provedeno formou sloupcových grafů. Zmíněné grafy mají za úkol ilustrovat trend jednotlivých studovaných parametrů v rámci účinku vysokých teplot a rovněž z pohledu parametrů modifikujících jednotlivé směsi (množství a typ substituentu hlinitanového cementu, materiál a množství použitých vláken). Cílem grafického vyhodnocení není informovat o všech konkrétních hodnotách vyšetřovaných parametrů. Číselně vyjádřené hodnoty studovaných parametrů konkrétních směsí, včetně procentuálního vyjádření jejich závislosti na působícím teplotním zatížení, uvádí tabulky v přílohách k disertační práci. Kromě postupného poklesu studovaných parametrů lze pozorovat i makroskopické změny v barevném spektru jednotlivých vzorků. Především vzorky s obsahem cihelného prachu vykazovaly nejmarkantnější barevné změny. Jak ilustruje **Obrázek 36** (na kterém je zobrazena směs s nejvyšší dávkou cihelného prachu, tj. 225 kg·m⁻³), dochází po výpalu při 600 °C pouze k nepatrné barevné změně. Markantní změnu v barevném odstínu lze pozorovat po účinku 1000 °C, kdy z původní hnědé barvy získaly vzorky světlý, téměř okrový odstín.

Následující výsledky byly již publikovány v několika článcích v recenzovaných impaktovaných časopisech, kdy autor této disertační práce byl součástí autorského kolektivu (jako hlavní autor, případně spoluautor). Jedná se o články v časopise *Advances in Mechanical Engineering (Fracture characteristics of refractory composites containing metakaolin and ceramic fibres 2015)* [170], *Advances in Materials Science and Engineering (Physical and Mechanical Properties of Composites Made with Aluminous Cement and Basalt Fibers Developed for High Temperature Application 2015)* [171], *Cement Wapno Beton (Influence of metakaolin addition on fracture properties of refractory concrete reinforced with basalt fibres 2016)* [172], *Advances in Civil Engineering (Development of Composite for Thermal Barriers Reinforced by Ceramic Fibers 2018)* [156].



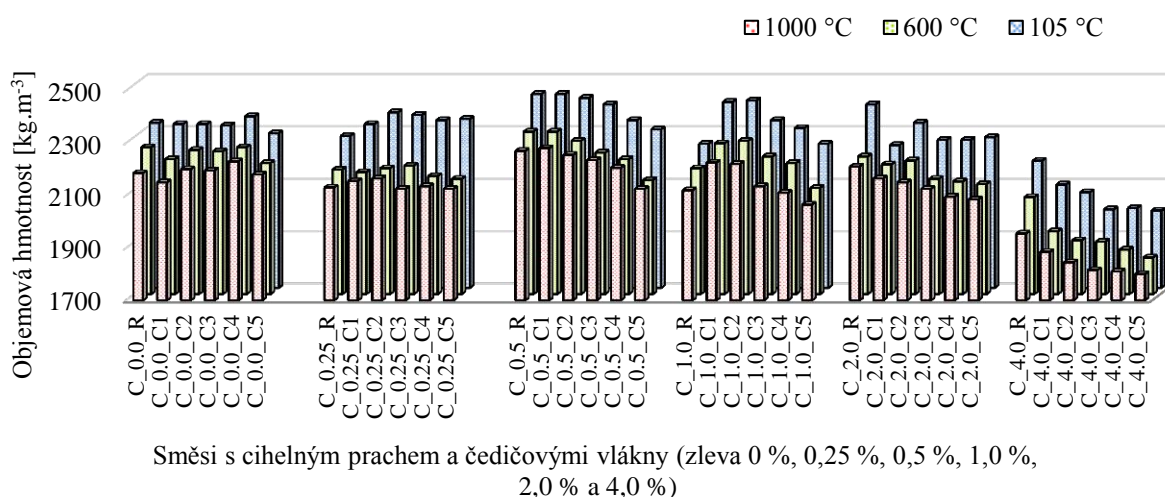
Obrázek 36 Ilustrace barevných změn vlivem výpalu na vzorcích se substitucí cihelným prachem (shora 105 °C, 600 °C a 1000 °C); jedná se o vzorky po provedené ohybové zkoušce, kdy vpravo je možné vidět vnitřní strukturu materiálu.

4.3.4.1 Objemová hmotnost

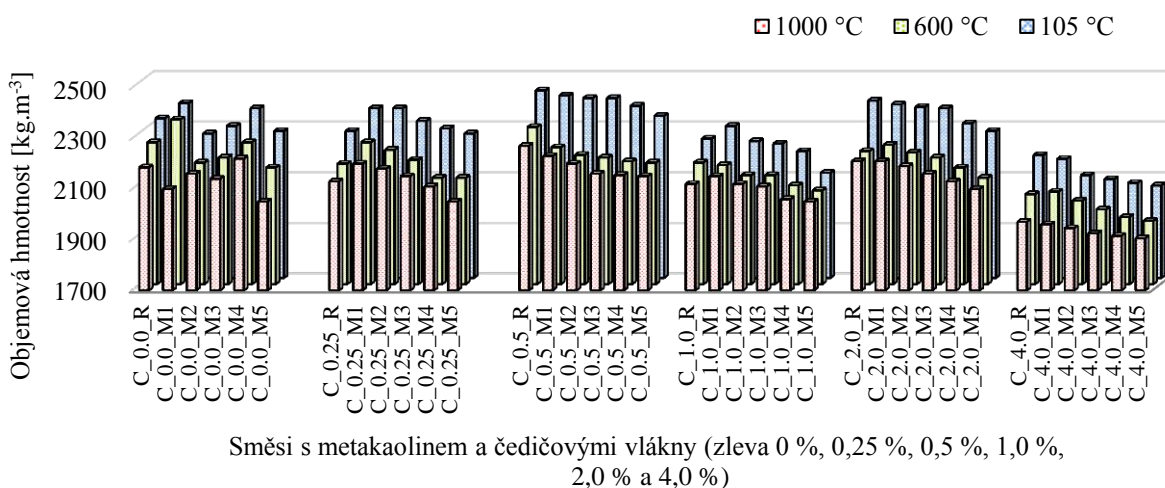
V souladu s obecnými principy a předpoklady docházelo k postupnému poklesu objemových hmotností vlivem zvyšující se úrovně teplotního zatížení, a to u všech sledovaných typů kompozitu. Jako referenční hladina pro srovnání vlivu teplotního zatížení byly použity vzorky vysušené při 105 °C. Prvotní změna objemové hmotnosti, a to velmi výrazná, nastává samozřejmě již při procesu vysoušení, kdy se z pórové struktury uvolňuje volná část fyzikálně vázané vody. Tato změna však nebyla předmětem zkoumání. Ze sloupových grafů (**Obrázek 37, 38, 39, 40**) lze vyčíst závislost mezi objemovou hmotností a množstvím hlinitanového cementu. S rostoucím množstvím substituentu, bez rozlišení zda cihelného prachu či metakaolinu, lze pozorovat pokles hodnot objemových hmotností. Uvedený jev souvisí s vyšší objemovou hmotností použitého hlinitanového cementu Secar®71 a týká se všech směsí, nezávisle na typu a množství použitých vláken. Další parametr ovlivňující objemovou hmotnost je množství čedičových resp. keramických vláken. Z grafického vyhodnocení můžeme pozorovat trend prvotního nárůstu objemové hmotnosti až do dávky čedičových vláken odpovídající cca 1,0 % (vztaženo k objemovým procentům), kdy jsou zaznamenány nejvyšší hodnoty objemových hmotností ve všech sledovaných teplotních režimech. Při následném postupném zvyšování množství použitých vláken, opět nezávisle na typu použité jemnozrné složky, objemová hmotnost klesá. Vysvětlení uvedeného jevu lze hledat ve vyšším obsahu vzduchových pórů, které vznikají při povrchu vláken při těchto vysokých dávkách. Rovněž čerstvá směs s maximálním použitým množstvím čedičových vláken, tj. 4,0 %, vykazovala značný obsah vzduchu, který byl částečně redukován při procesu hutnění (vibrolisování). Výrazný pokles objemové hmotnosti je patrný u směsí s obsahem 2,0 % až 4,0 % čedičových vláken. Rozdíl mezi 0,5 % a 4,0 % obsahu čedičových vláken v kombinaci s cihelným prachem při referenční teplotní hladině 105 °C činí 2390 kg·m⁻³ resp. 2060 kg·m⁻³, při 600 °C 2250 kg·m⁻³ resp. 1920 kg·m⁻³ a při 1000 °C 2225 kg·m⁻³ resp. 1850 kg·m⁻³. V případě použití metakaolinu a 0,5 % čedičových vláken jsou zjištěné hodnoty velmi podobné. Při použití 4,0 % čedičových vláken a metakaolinu vykazovaly vzorky vypálené při 1000 °C hodnotu objemové hmotnosti v úrovni 1940 kg·m⁻³. Při použití keramických vláken byly dosaženy velmi podobné výsledky v případě aplikace cihelného prachu i metakaolinu. U vysušených vzorků dosahuje průměrná objemová hmotnost při použití 0,25 % keramických vláken 2320 kg·m⁻³, zatímco při maximální dávce vláken

(8,0 %) $2220 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro stejné zastoupení vláken, ale při výpalu na $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahují průměrné hodnoty $2140 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, resp. $2080 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (pro 8,0 % keramických vláken).

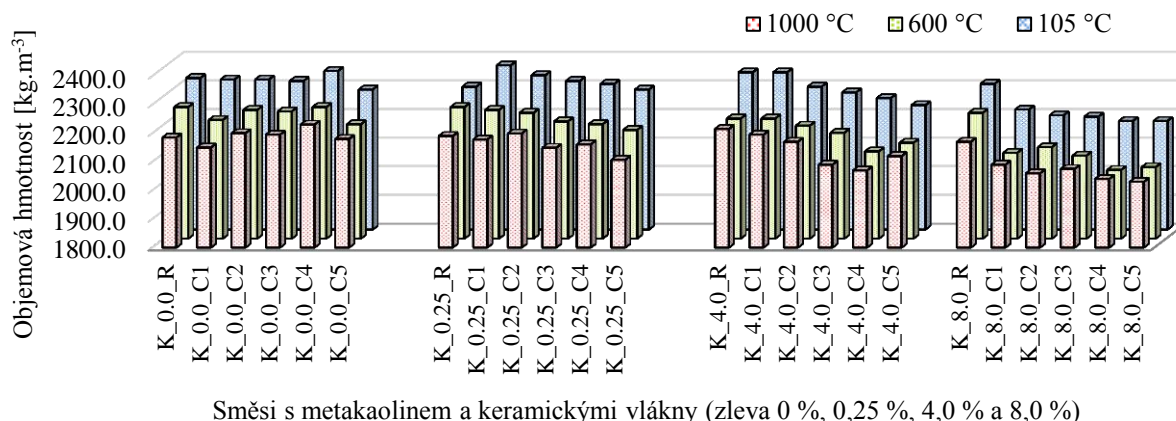
Z hlediska účinku teplotního zatížení dochází k největšímu poklesu objemové hmotnosti mezi vysušením ($105 \text{ }^\circ\text{C}$) a výpalem při $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Uvedené zjištění je v souladu s teoretickými poznatky, kdy v daném teplotním intervalu dochází k postupnému uvolňování vody v rámci dekompozice hydratačních produktů. Popsaný pokles u všech sledovaných směsí bez rozlišení typu či množství vláken v intervalu $105 \text{ }^\circ\text{C}$ až $600 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahuje pokles 4,2 % až 5,7 %. Porovnáme-li hodnoty objemových hmotností vzorků vysušených při $105 \text{ }^\circ\text{C}$ a vypálených při $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, zjistíme průměrný pokles cca 7,2 %. Rozdíl mezi $600 \text{ }^\circ\text{C}$ a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ z hlediska celkového průměru objemových hmotností činí 2 %.



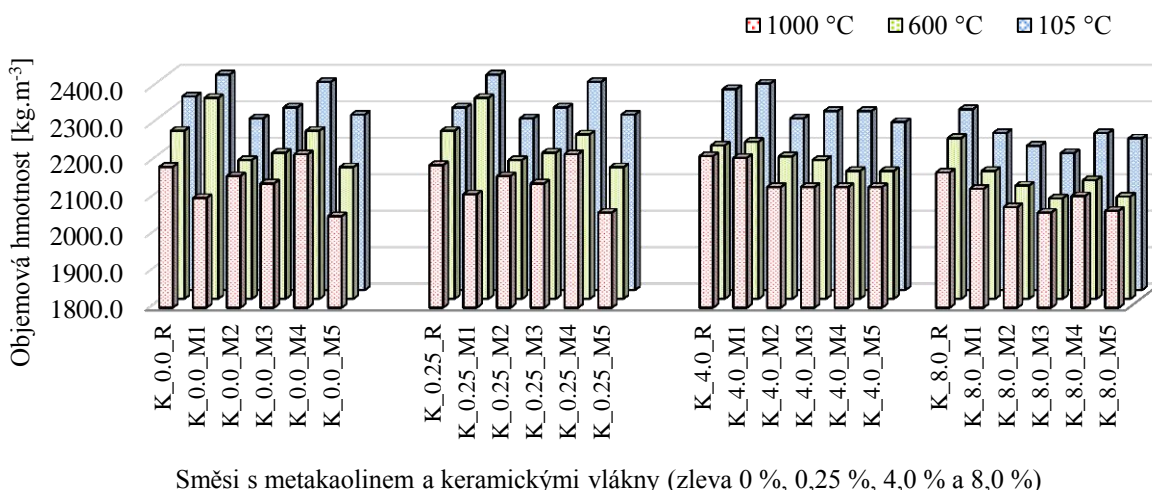
Obrázek 37 Hodnoty objemových hmotností směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.



Obrázek 38 Hodnoty objemových hmotností směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.



Obrázek 39 Hodnoty objemových hmotností směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.

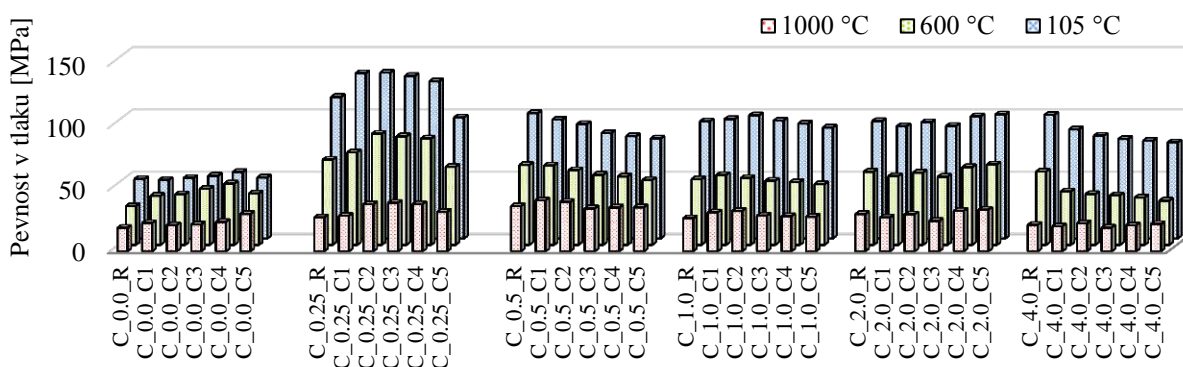


Obrázek 40 Hodnoty objemových hmotností směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.

4.3.4.2 Pevnost v tlaku

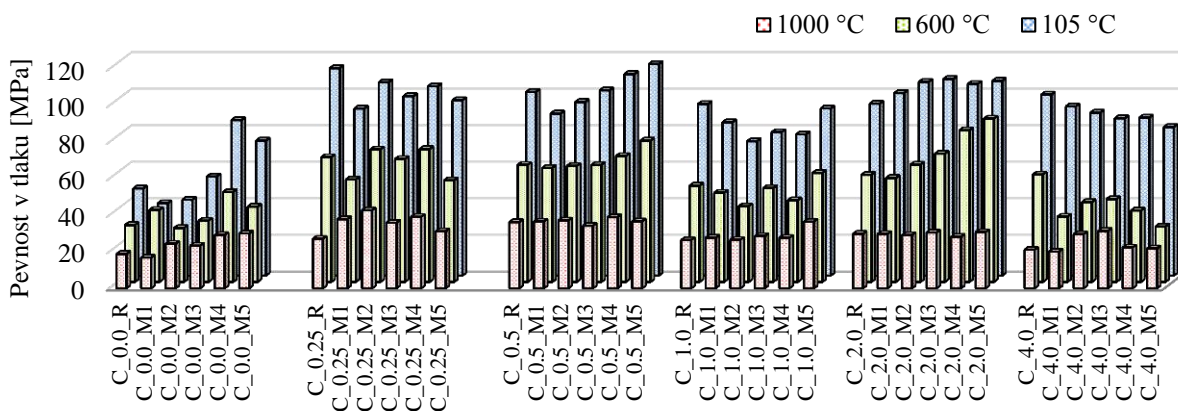
Nejnižších hodnot tlakových pevností bylo dosaženo na vzorcích bez čedičových či keramických vláken, jak vyplývá z grafického vyjádření na **Obrázcích 41, 42, 43** a **44**. Nejvyšších hodnot tlakových pevností bylo dosaženo při aplikaci 0,25 % čedičových vláken a cihelného prachu, a to průměrných 122 MPa. S rostoucím množstvím čedičových vláken lze pozorovat pokles tlakové pevnosti, který se nejvíce projeví v případě výpalu při 1000 °C. Účinek teplotního zatížení na hodnoty tlakové pevnosti se neprojevil tak výrazně, jako v případě níže popsaných pevností v tahu za ohybu. Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku vyšetřované na vzorcích s čedičovými vlákny bez rozlišení vlivu cihelného prachu či metakaolinu dosahovaly po 600 °C 65 % ve srovnání s hodnotami dosaženými na referenčních, tedy vysušených vzorcích. U směsí s keramickými vlákny tento pokles dosahoval mírně nižších hodnot (na úroveň 70 % původních hodnot). V případě keramických vláken lze pozorovat pozitivní vliv cihelného prachu, kdy s jeho zvyšujícím se obsahem dochází k nárůstu pevnosti v tlaku. Pro keramická vlákna se jeví jako optimální dávka 4 %, kdy vyšší množství použitých vláken již naráží na technologické limity z hlediska zpracování

a hutnění čerstvé směsi. Zaměříme-li se na referenční vzorky, na kterých neproběhlo teplotní zatěžování, dosahují směsi s čedičovými vlákny vyšších hodnot tlakových pevností ve srovnání s vlákny keramickými. Prvotní teplotní zatížení v úrovni 600 °C však vede k výraznějšímu poklesu u směsi vyztužených čedičovými vlákny a rozdíly oproti keramickým vláknům již nejsou tak značné. Stále je však u čedičových vláken (v dávkování 0,50 % až 1,0 %) dosaženo vyšších hodnot pevnosti v tlaku. V souladu se známými změnami, které probíhají v hlinitanovém cementu vystaveném působení teplotního zatížení, byl očekáván další pokles tlakové pevnosti vlivem výpalu při 1000 °C. Jak bylo uvedeno v teoretické části v kapitole 2.2.2.7, nejnižších mechanických parametrů dosahuje hlinitanový cement v intervalu 800 °C až 900 °C [13]. Reziduální pevnost v tlaku v případě čedičových vláken dosahovala průměrných 34 %, zatímco u vláken keramických činil tento průměr 41 %. I přes menší procentuální pokles tlakové pevnosti v případě keramických vláken bylo nejvyšších reziduálních pevností dosaženo použitím vláken čedičových.



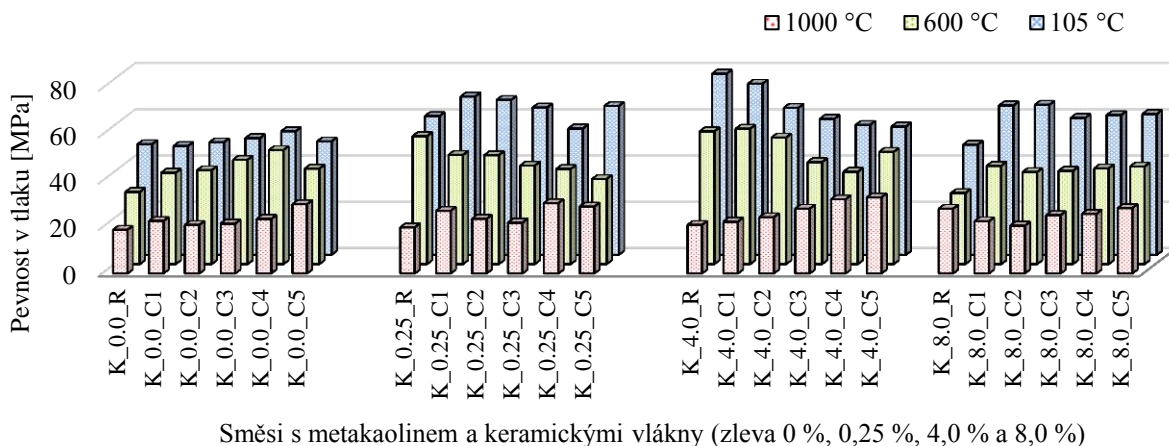
Směsi s cihelným prachem a čedičovými vlákny (zleva 0 %, 0,25 %, 0,5 %, 1,0 %, 2,0 % a 4,0 %)

Obrázek 41 Hodnoty pevností v tlaku směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.

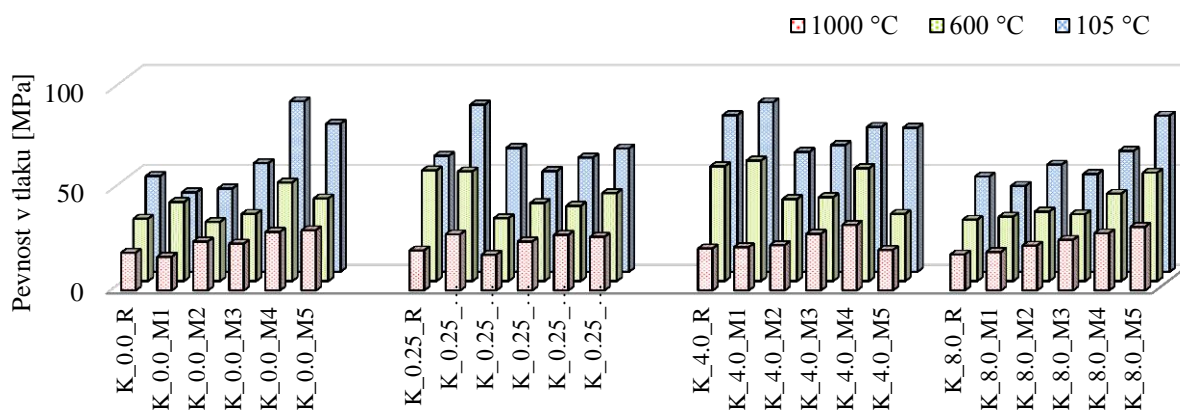


Směsi s metakaolinem a čedičovými vlákny (zleva 0 %, 0,25 %, 0,5 %, 1,0 %, 2,0 % a 4,0 %)

Obrázek 42 Hodnoty pevností v tlaku směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.



Obrázek 43 Hodnoty pevností v tlaku směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.

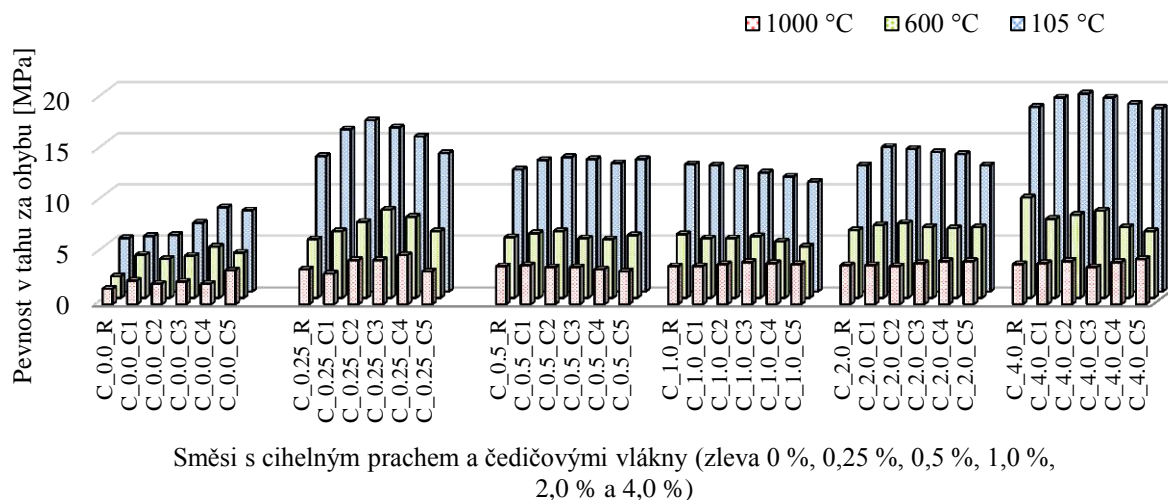


Obrázek 44 Hodnoty pevností v tlaku směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.

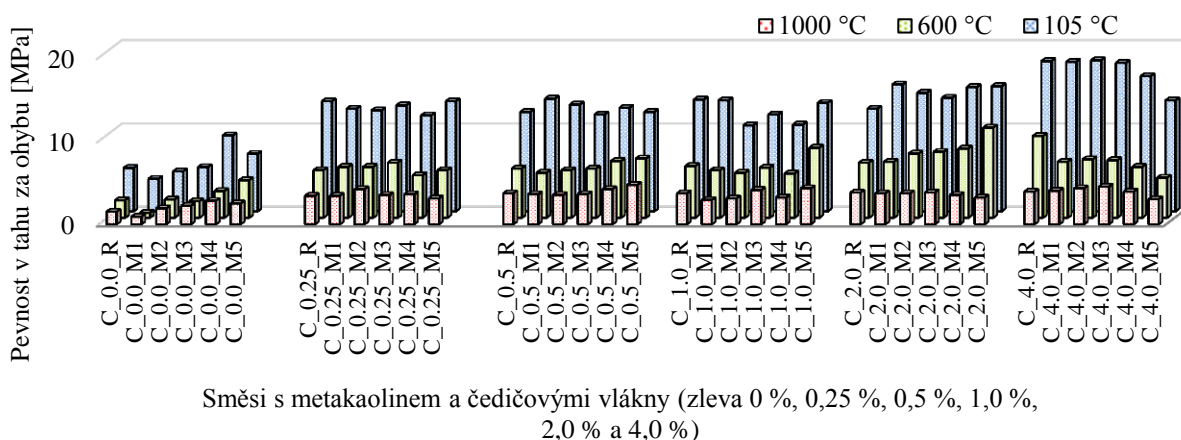
4.3.4.3 Pevnost v tahu za ohybu

Z grafického vyhodnocení hodnot pevnosti v tahu za ohybu (v dalším textu označeno jako „tahová pevnost“) plyne opačný trend, než bylo možné pozorovat v případě pevnosti v tlaku. V souladu s předpokladem tahová pevnost stoupá s rostoucím množstvím čedičových vláken (viz **Obrázek 45** a **46**). Výrazný vliv vláken se projevil zejména při použití maximální dávky čedičových vláken v množství 4,0 %. V případě použití daného množství čedičových vláken však již dochází k výše popsanému poklesu pevnosti v tlaku. Vzorky bez výpalu pouze vysušené při 105 °C dosahují průměrné pevnosti v tahu za ohybu 14,3 MPa při použití cihelného prachu, resp. 13,6 MPa pro metakaolin. Směsi s keramickými vlákny bez teplotního zatížení charakterizuje průměrná pevnost v tahu za ohybu 9,0 MPa. Průměrné hodnoty tahové pevnosti po výpalu ovlivňuje použitý substituent cementu pouze v řádu desetin MPa. Pevnost v tahu za ohybu po výpalu při 600 °C u směsí s čedičovými vlákny dosahuje průměrných 6,6 MPa, zatímco v případě keramických vláken se jedná o 4,2 MPa. Následný výpal na úrovni 1000 °C znamená pokles pevnosti v tahu za ohybu na průměrných 3,8 MPa, resp. 2,7 MPa při použití keramických vláken. Ve srovnání s pevností v tlaku je ohybová

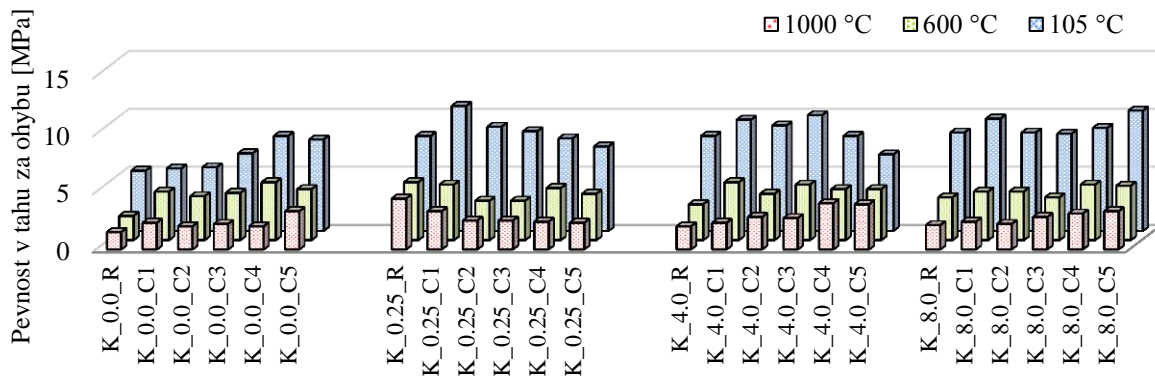
charakteristika více citlivá na účinek vysokých teplot. V případě čedičových vláken můžeme účinek 600 °C vyjádřit 52% poklesem pevnosti v tahu za ohybu, pro keramická vlákna pak průměrný pokles odpovídá 53 %. Teplotní zatížení v úrovni 1000 °C pak znamená pokles na 28 % referenčních hodnot pro čedičová vlákna. V případě keramických vláken dochází k poklesu pevnosti v tahu za ohybu na průměrných 36 % referenčních hodnot.



Obrázek 45 Hodnoty pevností v tahu za ohybu směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.

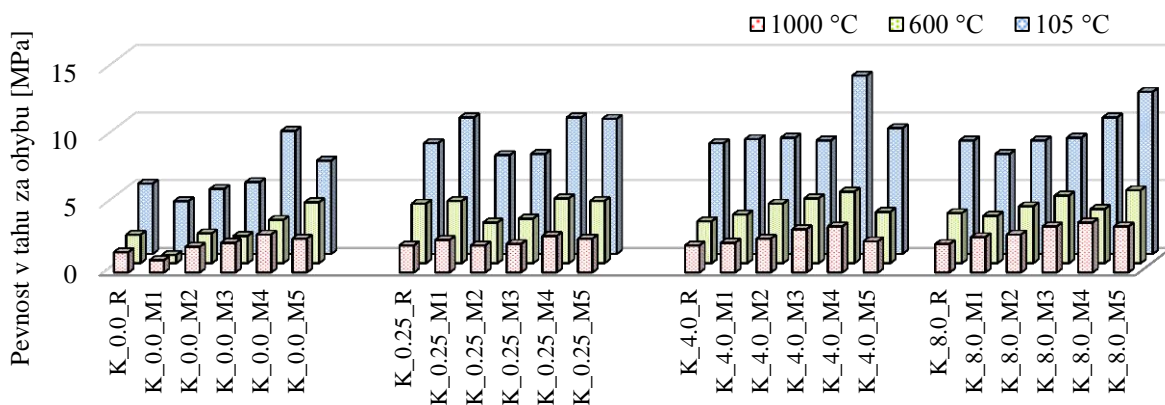


Obrázek 46 Hodnoty pevností v tahu za ohybu směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.



Směsi s cihelným prachem a keramickými vlákny (zleva 0 %, 0,25 %, 4,0 % a 8,0 %)

Obrázek 47 Hodnoty pevností v tahu za ohybu směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.



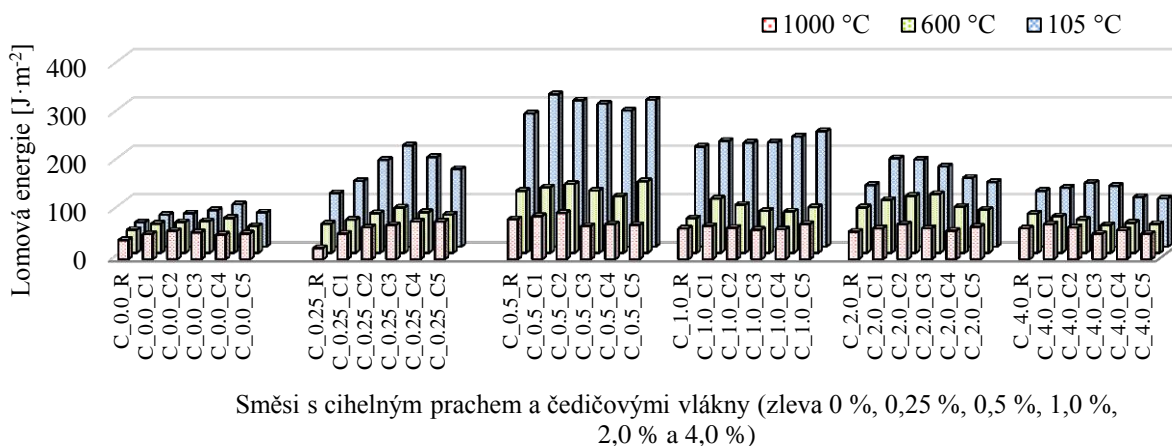
Směsi s metakaolinem a keramickými vlákny (zleva 0 %, 0,25 %, 4,0 % a 8,0 %)

Obrázek 48 Hodnoty pevností v tahu za ohybu směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.

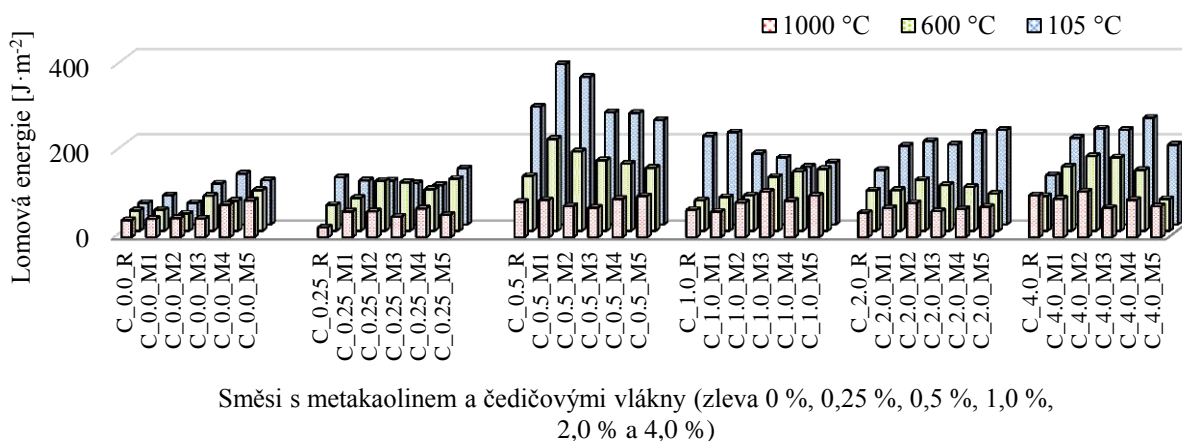
4.3.4.4 Lomová energie

Vliv vláken z hlediska mechanických parametrů lze rovněž kvantifikovat pomocí pevnosti v tahu za ohybu, jak bylo uvedeno výše. Lomová energie postihuje průběh ohybové zkoušky také po dosažení maximální pevnosti zkoušeného vzorku, tj. včetně sestupné větve pracovního diagramu, jak shrnují grafy na **Obrázku 49, 50, 51 a 52**. Vysušené vzorky s čedičovými vlákny dosahovaly v průměru stejných hodnot lomové energie ($190 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$), zatímco průměrná hodnota v případě použití keramických vláken činila $142 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$. Průměrná hodnota lomové energie vypočtená na základě hodnot získaných na vzorcích vypálených při $600 \text{ }^\circ\text{C}$ v případě keramických vláken dosahuje $85 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ ($84 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ pro směsi s cihelným prachem a $86 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ pro metakaolin). Uvedené hodnoty odpovídají průměrným 61 % referenčních hodnot. Průměrné hodnoty lomových energií s čedičovými vlákny dosahují v případě použití cihelného prachu $95 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, resp. $120 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ pro směsi s metakaolinem. Průměrná lomová energie po výpalu při $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahovala u všech sledovaných směsí 40 % referenčních hodnot. Z hlediska absolutních hodnot dosahuje průměrná lomová energie směsí s čedičovými vlákny $66 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ pro cihelný prach a $74 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ pro metakaolin. V případě

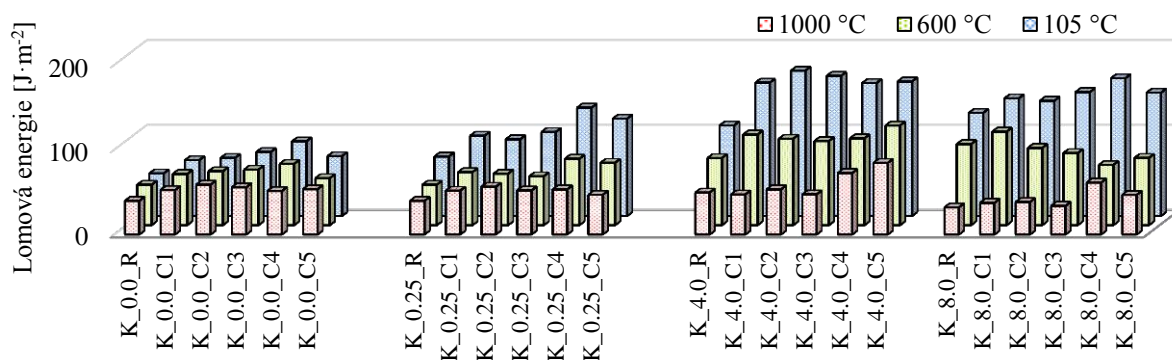
keramických vláken jsou tyto hodnoty $50 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ pro cihelný prach resp. $60 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ pro metakaolin.



Obrázek 49 Hodnoty lomových energií směsí s odlišnou cihelného prachu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.

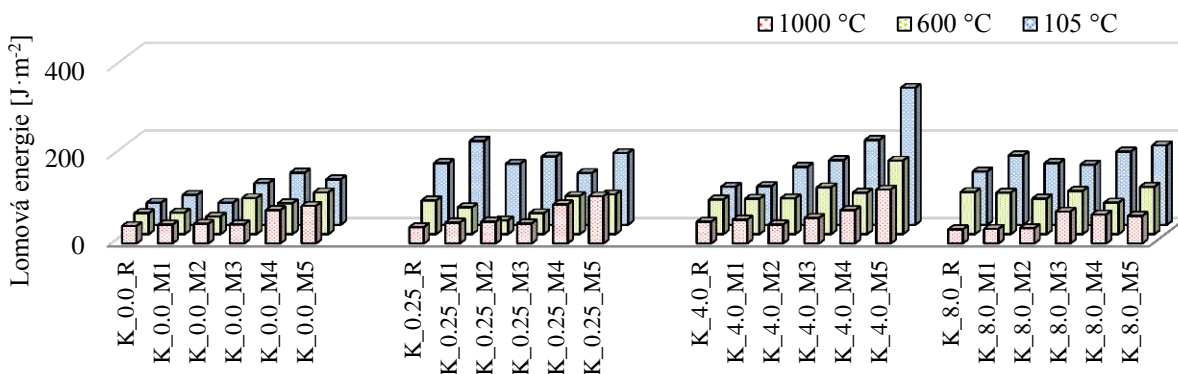


Obrázek 50 Hodnoty lomových energií směsí s odlišnou metakaolinu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.



Směsi s cihelným prachem a keramickými vlákny (zleva 0 %, 0,25 %, 4,0 % a 8,0 %)

Obrázek 51 Hodnoty lomových energií směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.



Směsi s metakaolinem a keramickými vlákny (zleva 0 %, 0,25 %, 4,0 % a 8,0 %)

Obrázek 52 Hodnoty lomových energií směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.

4.3.5 Závěry a shrnutí

Detailní diskuze výsledků sledovaných parametrů je obsažena v předchozích dílčích závěrech. Z prezentovaných výsledků plyne pokles objemových hmotností s rostoucím zastoupením substituentu hlinitanového cementu (metakaolin a cihelný prach) nezávisle na úrovni teplotního zatížení. Objemová hmotnost rovněž klesá s rostoucím obsahem vláken nezávisle na druhu materiálu. Maximální dávky vláken (2 % či 4 % v případě čedičových a 8 % v případě keramických) již nejsou vhodné z hlediska tlakových pevností a rovněž z důvodu ztížené zpracovatelnosti čerstvé směsi, vyžadující při svém ukládání kombinaci vibrování a lisování. Maximální použitá dávka vláken koresponduje s nejvyššími dosaženými pevnostmi v tahu za ohybu. Metakaolin a cihelný prach se osvědčily jako plnohodnotná součást cementového kompozitu využitelného v prostředí s vysokými teplotami. Při zohlednění dosažených mechanických parametrů a vlastností čerstvé směsi se množství 0,5 % až 1,0 % čedičových vláken a 4,0 % keramických vláken (vztaheno k objemovým procentům) jeví jako optimální množství z hlediska sledovaných parametrů. Požadujeme-li maximální mechanické parametry za současného zachování vhodné zpracovatelnosti, jeví se jako optimální substituce hlinitanového cementu ve výši 15 % (metakaolinem či cihelným

prachem). V kontextu trendů snižování energetické náročnosti materiálů a jejich environmentálního dopadu za současné snahy opětovného využití odpadních materiálů se použití maximální substituce hlinitanového cementu cihelným prachem ve výši 25 % jeví jako vhodné řešení při zachování mechanických parametrů.

4.4 TEPLOTNÍ ZATĚŽOVÁNÍ V ROZMEZÍ 100 °C AŽ 1000 °C

Teoretická část disertační práce popisuje rovněž postupné změny v chemické struktuře pojivového systému cementových kompozitů vlivem různých úrovní teplotního zatížení. Rovněž změny v hlinitanovém cementu probíhají v rámci širokého teplotního spektra a jsou spojeny s mineralogickými, fyzikálně chemickými a chemickými procesy. Prvotní dehydratace hlinitanových cementů probíhá již při procesu vysoušení a pokračuje se zvyšující se intenzitou působícího teplotního zatížení. Vzhledem k jednomu z cílů disertační práce a za účelem detailnějšího popisu vlivu vysokých teplot na vybrané parametry byl proveden následující prohlubující experimentální program.

Na základě vyhodnocení výsledných hodnot z předchozí části (kapitola 4.3) s uvážením dalších parametrů jako je zpracovatelnost, chování čerstvé směsi a rovněž environmentální hledisko, bylo vybráno celkem šest směsí, které byly podrobeny podrobnější analýze. Ze směsí s čedičovými vlákny byly vybrány dvě s příměsí metakaolinu (obsah čedičových vláken 0,5 % a 1,0 %) a dvě směsi s příměsí cihelného prachu o identickém obsahu čedičových vláken. V případě keramických vláken byla podrobnější analýze podrobena jedna směs s cihelným prachem a druhá směs s metakaolinem, obě s obsahem 4,0 % vláken. Oproti předchozímu režimu teplotního zatěžování (vysoušení při 100 °C a výpal při 600 °C a 1000 °C) bylo v této části provedeno teplotní zatěžování odstupňované po 100 °C (100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C, 900 °C, 1000 °C). Níže popsané výsledky publikoval autor v časopise *Periodica Polytechnica Civil Engineering (Response of refractory cement based composite to gradual temperature loading 2018)* [157] a dále v rámci příspěvků na konferencích Thermophysics 2018 a Experimental Stress Analysis 2018.

4.4.1 Vyšetřované směsi

Na základě multikriteriálního hodnocení dosažených parametrů v rámci výše provedeného dílčího experimentálního programu (viz kapitola 4.3) bylo vybráno celkem šest směsí, jejichž složení a označení uvádí následující **Tabulka 8**. Při výběru hrály důležitou roli mechanické parametry zjišťované ve všech sledovaných teplotních podmínkách a rovněž chování čerstvé směsi (zpracovatelnost bez nutnosti dusání či dlouhého vibrování, homogenita a absence segregace kameniva). Na základě uvedených parametrů byly vybrány čtyři směsi s čedičovými vlákny (0,5 % a 1,0 %) dvě s obsahem metakaolinu a dvě s obsahem cihelného prachu. Použitý soubor dále doplnily dvě směsi s keramickými vlákny, lišící se pouze použitím metakaolinu či cihelného prachu.

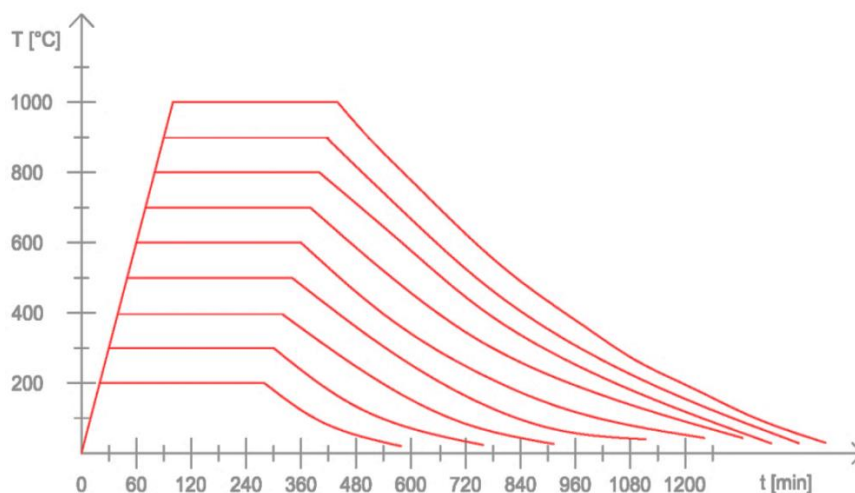
Tabulka 8 Složení použitých směsí pro detailnější teplotní zatěžování.

Označení	Složky směsi kompozitního materiálu [kg·m ⁻³]			
	Tekuté složky	Čedičové kamenivo	Vlákna	Jemné podíly

	plastifikátor	voda	0-4 mm	2-5 mm	čedičová		keramická	hlinitanový cement	cihelný prach (C) / metakaolin (M)
					6,35 mm	12,7 mm			
C_0,5_M5	22,75	224	880	220	1,45	13,05	0	720	180 (C)
C_1,0_M5	22,75	224	880	220	1,45	13,05	0	720	180 (M)
C_0,5_C5	22,75	224	880	220	2,90	26,10	0	720	180 (C)
C_1,0_C5	22,75	224	880	220	2,90	26,10	0	720	180 (M)
K_4,0_C5	22,75	224	880	220	0	0	80	720	180 (C)
K_4,0_M5	22,75	224	880	220	0	0	80	720	180 (M)

4.4.2 Teplotní zatěžování

Veškeré parametry teplotních zatěžovacích cyklů vyjma maximální dosažené teploty odpovídaly předchozímu provedenému teplotnímu zatěžování, popsánému v kapitole 3.2. Jak bylo zmíněno výše, probíhala analýza vybraných vlastností detailněji než v případě úvodního experimentálního programu. Vzorky byly zkoušeny opět v elektrické laboratorní peci Clasic Clare 4.0 opět po dobu 180 minut v úrovni zvolené maximální teploty. Z důvodu popisu postupných změn bylo rozmezí mezi jednotlivými zatěžovacími úrovněmi zvoleno po 100 °C. Vzorky vysušené při 105 °C opět reprezentovaly srovnávací (referenční) úroveň, ke které byly vztaženy zbývající dosažené výsledky vzorků zatížených vyššími teplotami. Teplotní zatěžování proběhlo v úrovních 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C, 900 °C a 1000 °C, jak ilustrativně znázorňuje **Obrázek 53**.



Obrázek 53 Schéma provedeného teplotního zatěžování.

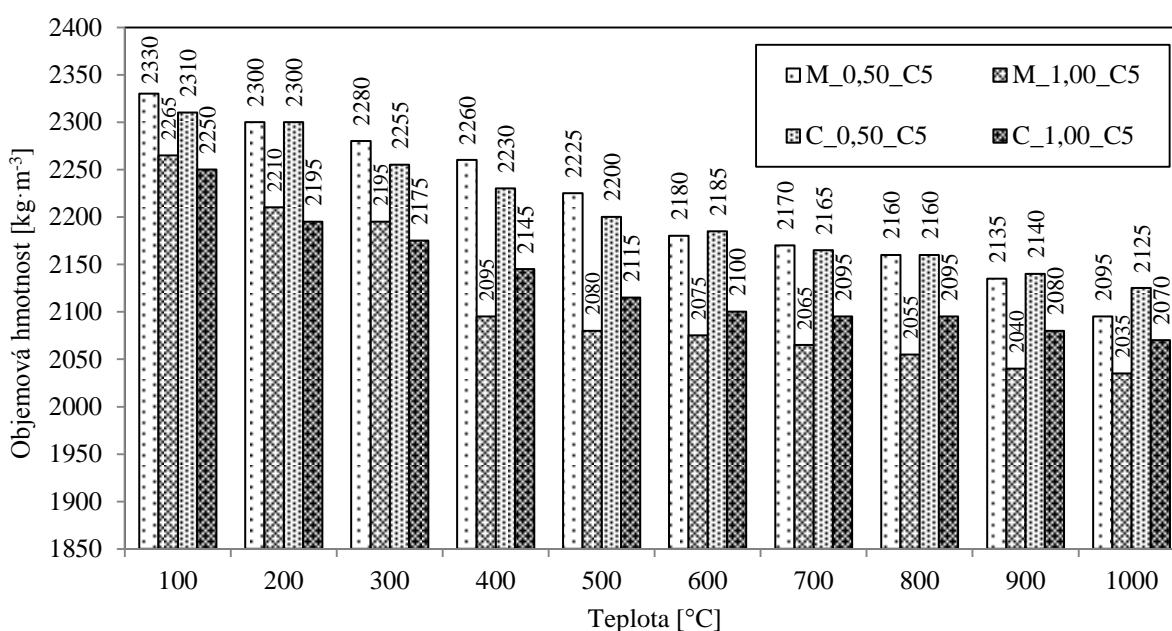
4.4.3 Vyšetřované parametry, jejich hodnoty a diskuze

V souladu s již dříve provedenými analýzami byly vyšetřovány hodnoty objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a lomové energie. Nově bylo do souboru laboratorních zkoušek zařazeno nedestruktivní testování dynamického modulu pružnosti na základě ultrazvukové pulsní metody. Následující kapitoly shrnují poznatky získané

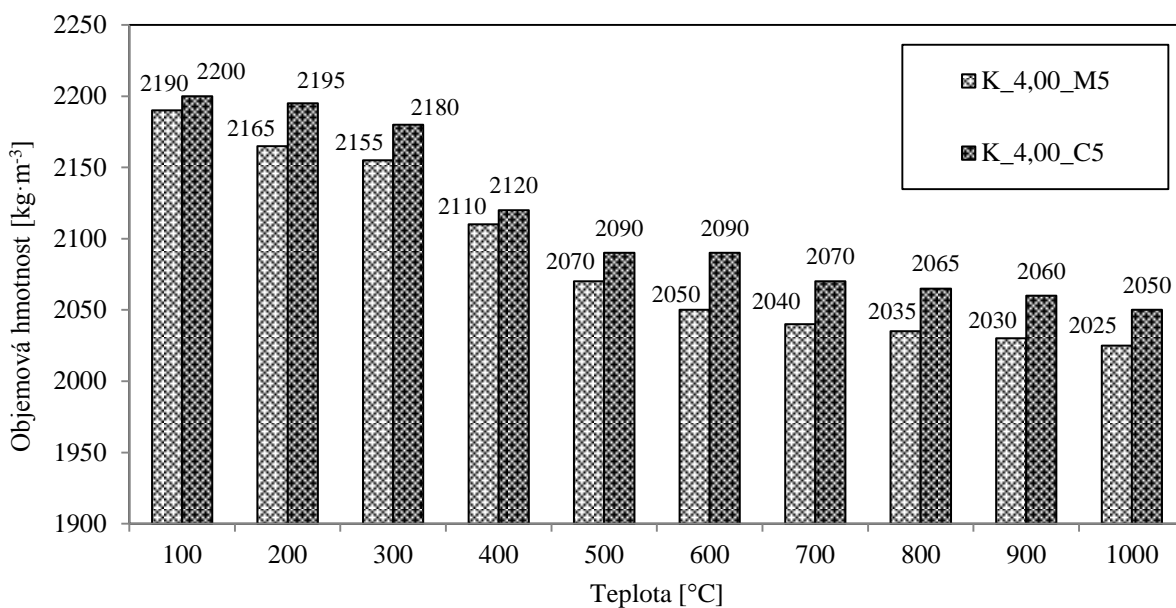
vyhodnocením vyšetřovaných parametrů. Pro popis vlivu teplotního zatížení stoupající intenzity byly použity sloupcové grafy. Jednotlivé hodnoty výše uvedených parametrů všech vyšetřovaných směsí jsou uvedeny v jednotlivých přílohách k disertační práci.

4.4.3.1 Objemová hmotnost

Postupný pokles hodnot objemových hmotností vlivem účinku vysokých teplot popisují následující sloupcové grafy. Vyhodnocení je provedeno samostatně pro směsi s čedičovými vlákny a samostatně pro směsi s keramickými vlákny. Zaměříme-li se na vliv množství čedičových vláken na hodnoty objemové hmotnosti, je možné pozorovat pokles daného parametru s navyšováním obsahu vláken. Dále lze říci, že směsi vyšetřovaného kompozitu můžeme vidět na **Obrázcích 55** a **56**. Směsi obsahující metakaolin dosahují vyšších objemových hmotností v porovnání se směsí s dávkou cihelného prachu (samozřejmě porovnávané-li při identickém množství vláken). Obdobnou tendenci lze pozorovat i v případě použití keramických vláken, kdy směsi s metakaolinem charakterizuje vyšší objemová hmotnost než v případě směsi s cihelným prachem. Rozdíl je však v řádu cca 1 % až 2 %. Účinek 1000 °C se projevil cca 10% poklesem objemové hmotnosti v případě směsi s metakaolinem a čedičovými vlákny, resp. cca 8% poklesem objemové hmotnosti v případě cihelného prachu a čedičových vláken. Pokles objemové hmotnosti u směsi s keramickými vlákny dosahuje nižších hodnot, a to v úrovni cca 7 %. Zaměříme-li se na intenzitu poklesu, pak teplotní interval, kdy dochází k největšímu poklesu objemové hmotnosti, lze identifikovat mezi 300 °C a 500 °C. Tento pokles lze vyjádřit v rozmezí 4,5 % až 6,0 %. Tento pokles objemové hmotnosti je v souladu s dekompozicí hydratačních produktů, popsanou rovněž v literatuře [66].



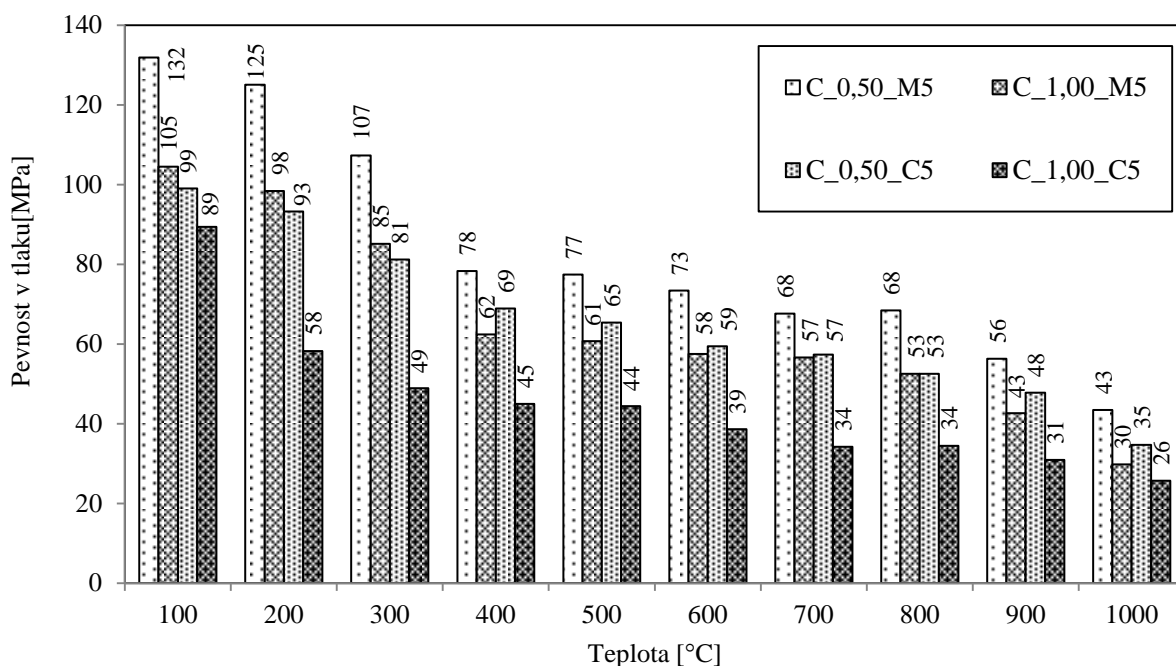
Obrázek 54 Hodnoty objemové hmotnosti směsí s čedičovými vlákny.



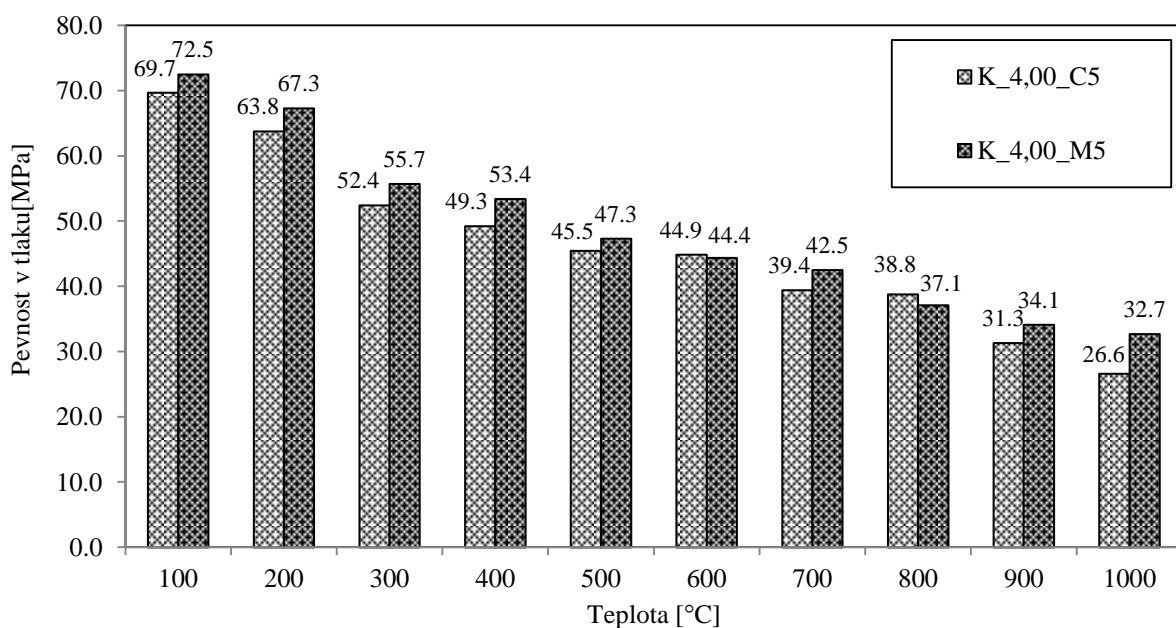
Obrázek 55 Hodnoty objemové hmotnosti směsí s keramickými vlákny.

4.4.3.2 Pevnost v tlaku

Vliv postupně narůstajícího teplotního zařízení na pevnost v tlaku u vybraných směsí s čedičovými vlákny znázorňuje graf na **Obrázku 56**, směsi s keramickými vlákny zobrazuje **Obrázek 57**. Obdobně jako v případě objemových hmotností i pevnost tlaku je inverzní k obsahu vláken. Směs s vyšším obsahem čedičových vláken charakterizuje nižší pevnost v tlaku. Obdobné výsledky byly pozorovány rovněž v případě vysokopevnostních betonů např. s ocelovými vlákny [173]. Směsi s metakaolinem, nezávisle na typu materiálu použitých vláken, charakterizují vyšší hodnoty tlakové pevnosti. První markantní pokles tlakové pevnosti nastává po teplotním zatížení v úrovni 300 °C. Následující pokles je pozvolně klesající. Další zřetelný pokles lze identifikovat mezi 800 °C až 1000 °C. Vyjma směsi C_1,0_C5 odpovídá tlaková pevnost po zatížení 300 °C (při použití čedičových vláken) cca 82 %, vztaheno k referenční úrovni 100 % = 100 °C. V případě keramických vláken je tento pokles ještě větší, a to na cca 76 %. V případě tlakové pevnosti po teplotním zatížení v úrovni 1000 °C pro směsi s čedičovými vlákny činí pokles 28 – 35 % původní pevnosti. Pro směsi s keramickými vlákny činí pokles 45 % pro metakaolin, resp. 38 % pro cihelný prach. Keramická vlákna v použitém množství charakterizuje nižší pevnost v referenční úrovni (100 °C), ale celkový pokles (v úrovni 1000 °C) je menší.



Obrázek 56 Hodnoty pevnosti v tlaku směsí s čedičovými vlákny.

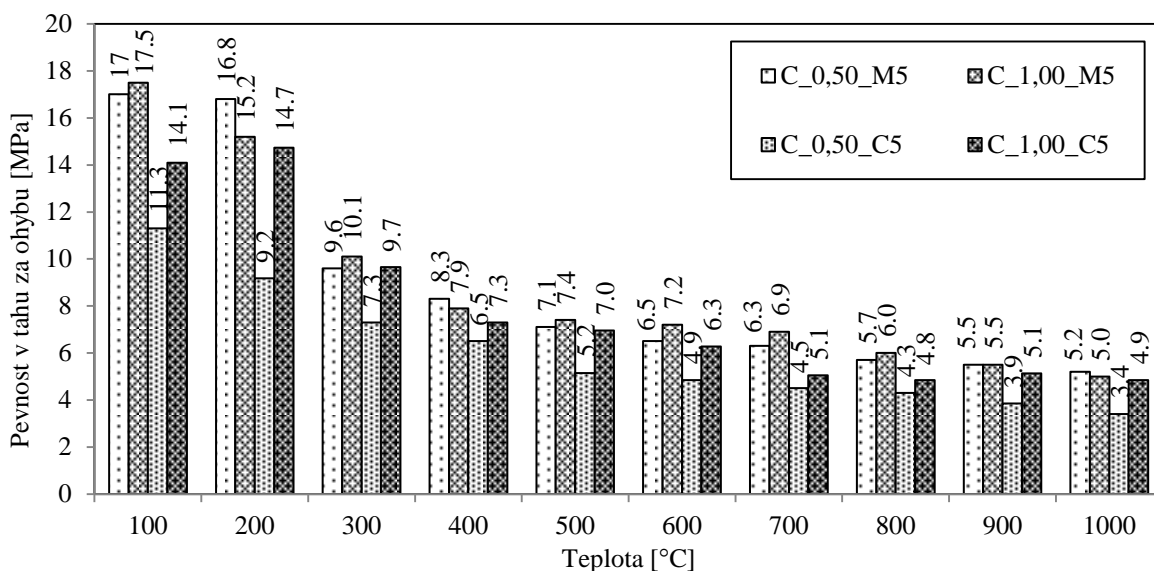


Obrázek 57 Hodnoty pevnosti v tlaku směsí s keramickými vlákny.

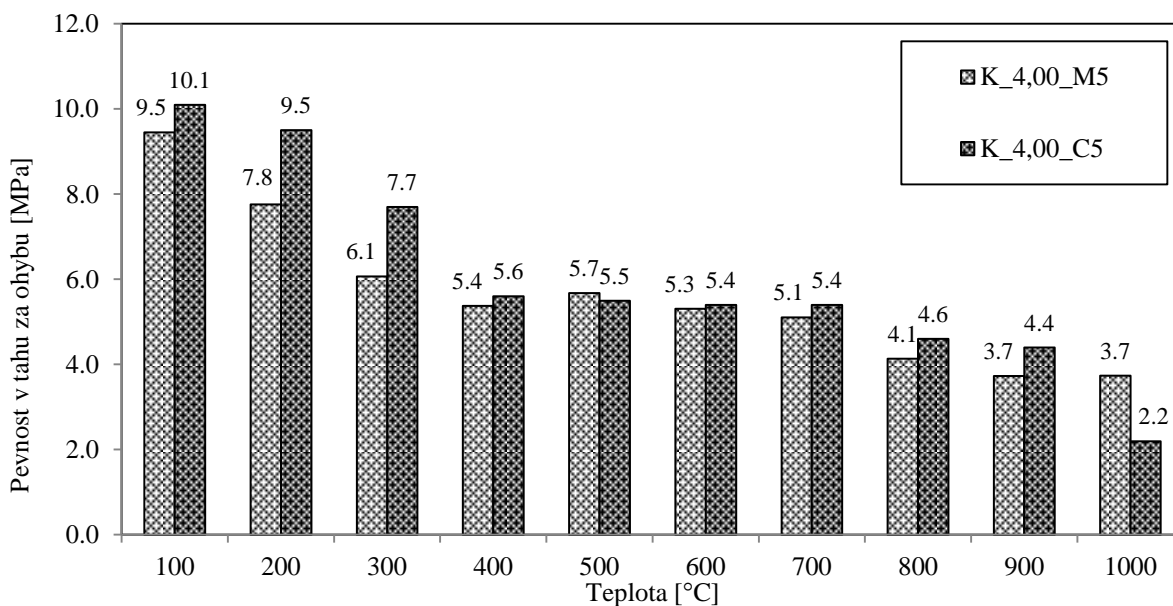
4.4.3.3 Pevnost v tahu za ohybu

Účinek postupně narůstajících vysokých teplot na hodnoty pevnosti v tahu za ohybu u směsí s čedičovými vlákny popisuje **Obrázek 58**, zatímco vyhodnocení směsí s keramickými vlákny ilustruje **Obrázek 59**. Z hlediska trendu poklesu pevnosti v tahu za ohybu lze nejvýznamnější změnu identifikovat po účinku teplotního zatížení v úrovni 300 °C. Následný pokles je pozvolný. Výpal při 300 °C se projevil poklesem o cca 43 % u čedičových vláken a metakaolinu, resp. cca 34 % u čedičových vláken a cihelného prachu. V případě keramických vláken není tento pokles tak prudký (cca 25 %, resp. 35 % u cihelného prachu). Následuje poměrně pozvolný pokles pevnosti v tahu za ohybu a další znatelný pokles nastává

přibližně v úrovni 800 °C. Reziduální pevnost v tahu za ohybu po výpalu na 1000 °C odpovídá cca 30 % původních hodnot v případě směsi s metakaolinem a čedičovými vlákny. V případě cihelného prachu a čedičových vláken jsou reziduální pevnosti vyšší, odpovídají cca 36 % původních hodnot. Pro keramická vlákna jsou reziduální pevnosti po 1000 °C výpalu cca 32 % pro metakaolin, resp. 39 % v případě cihelného prachu. V případě pevnosti v tahu za ohybu byl pozorován opačný efekt než v případě tlakové pevnosti. Projevil se očekávaný efekt čedičových vláken, kdy směsi s 1% obsahem vláken lze charakterizovat vyšší pevností v tahu za ohybu než v případě použití 0,5% dávky. Nezávisle na typu použitých vláken dosahují směsi s metakaolinem vyšších pevností než směsi obsahující jemně mletý cihelný prach.



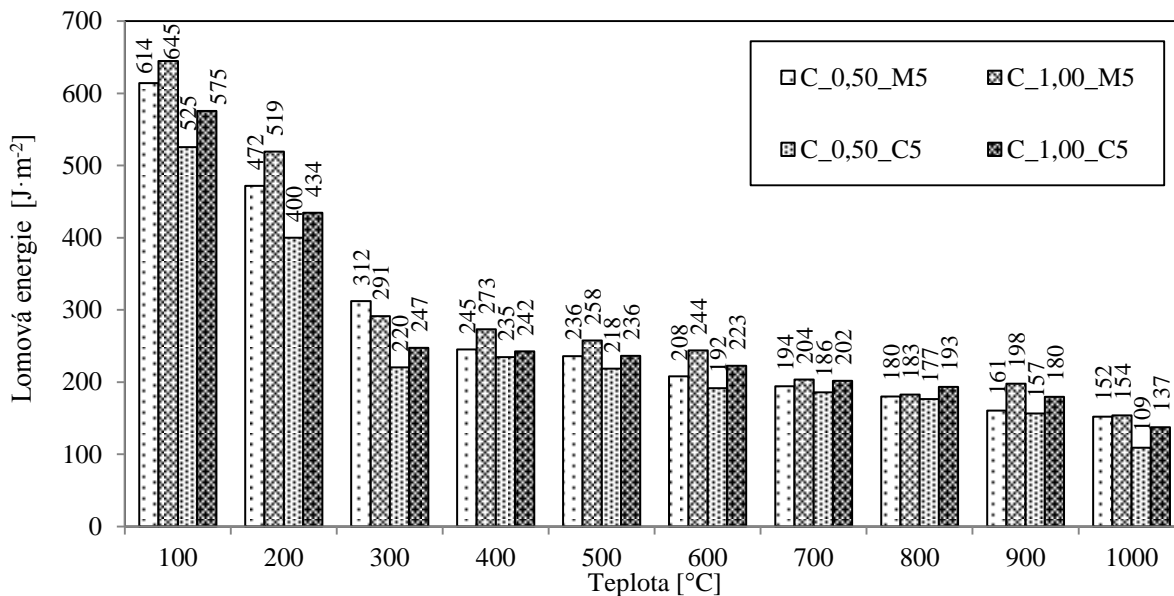
Obrázek 58 Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu směsí s čedičovými vlákny.



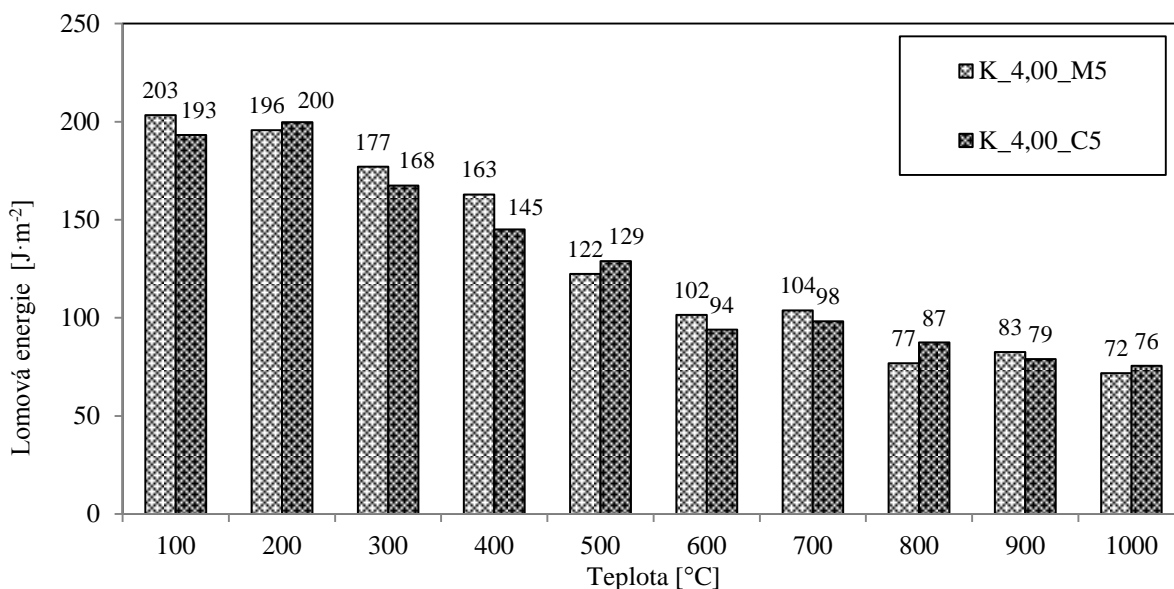
Obrázek 59 Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu směsí s keramickými vlákny.

4.4.3.4 Lomová energie

Grafy na **Obrázcích 60** a **61** zobrazují závislost lomové energie na intenzitě teplotního zatížení. Již z principu kalkulace lomové energie je zjevné, že jedním, nikoliv však jediným parametrem ovlivňujícím tuto veličinu je pevnost v tahu za ohybu, respektive průběh ohybové zkoušky. Z uvedeného důvodu lze vysvětlit největší pokles lomových energií po překročení hranice 300 °C, především u směsí s čedičovými vlákny. V absolutních hodnotách vykazují směsi s keramickými vlákny nižší hodnoty, avšak následný pokles není tak rychlý. Porovnáme-li hodnoty po výpalu při 1000 °C, dosahuje tento rozdíl již pouze cca dvojnásobek.



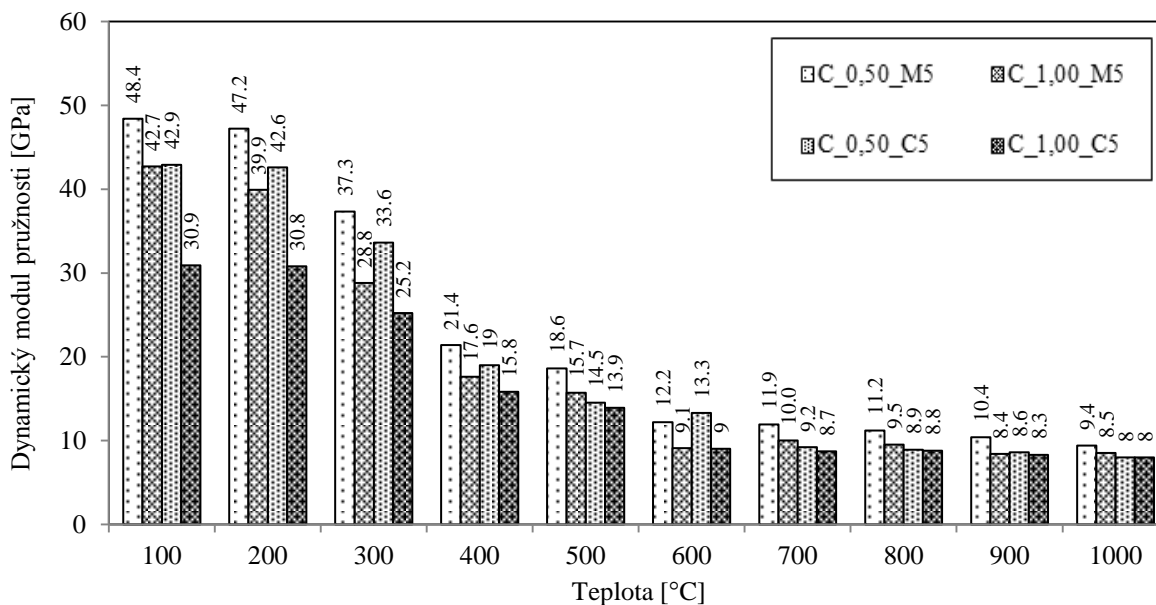
Obrázek 60 Hodnoty lomových energií směsí s čedičovými vlákny.



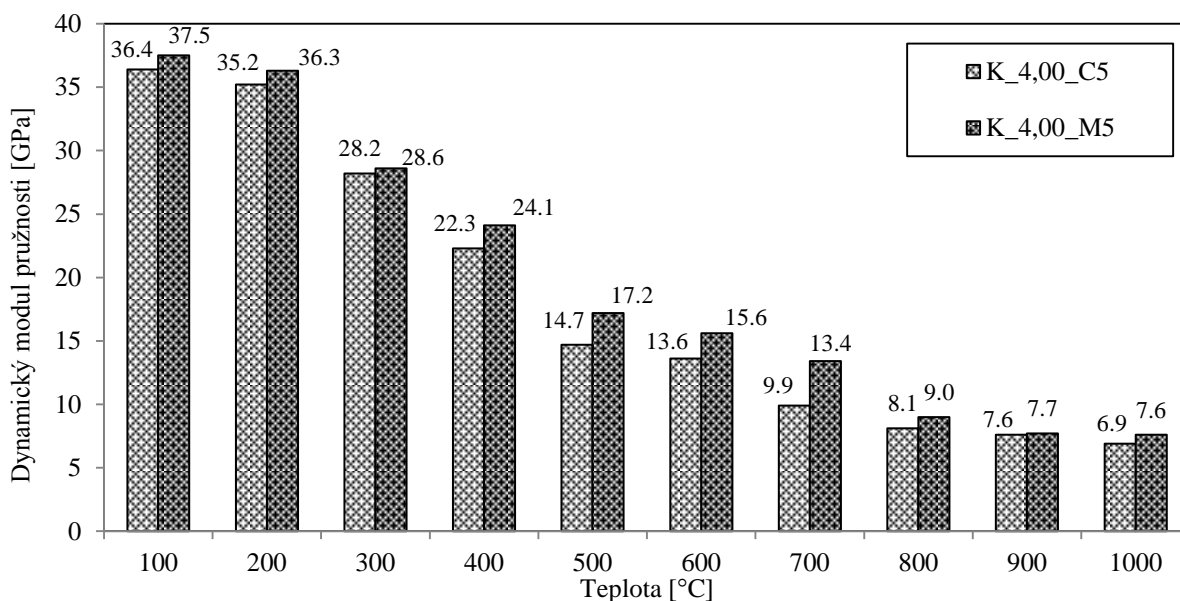
Obrázek 61 Hodnoty lomových energií směsí s keramickými vlákny.

4.4.3.5 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti je materiálová charakteristika, která je závislá na objemové hmotnosti materiálu. S postupnou ztrátou vody (fyzikálně a chemicky vázané) dochází rovněž k poklesu dynamického modulu pružnosti. Z tohoto důvodu bylo nutné provádět měření rychlosti průchodu ultrazvukových vln, ze kterých se následně vypočítá dynamický modul pružnosti, viz vztah (12), vždy ve stejném vlhkostním a teplotním stavu. Na konci procesu teplotního zatěžování jsou vzorky zbaveny vlhkosti. Ponecháme-li je v laboratorních podmínkách, započne proces absorpce vzdušné vlhkosti do vnitřní struktury materiálu, čímž dojde k nárůstu objemové hmotnosti, což má vliv na hodnoty dynamického modulu pružnosti. Z hlediska trendu lze tedy pozorovat obdobnou tendenci jako v případě objemové hmotnosti. Tato nedestruktivní metoda dobře popisuje trend postupného účinku vysokých teplot. Od cca 600 °C se již hodnoty dynamického modulu pružnosti výrazně nemění. Tento trend lze pozorovat především u směsi s čedičovými vlákny.



Obrázek 62 Hodnoty dynamického modulu pružnosti směsi s čedičovými vlákny.



Obrázek 63 Hodnoty dynamického modulu pružnosti směsí s keramickými vlákny.

4.4.4 Dílčí závěr

Výše uvedené grafy popisují závislost (pokles) studovaných parametrů na postupně narůstající intenzitě teplotního zatížení v rozmezí 100 °C až 1000 °C. Číselné hodnoty včetně procentuálního vyjádření jsou součástí přílohy části disertační práce. Objemová hmotnost je základní parametr, který vystihuje vliv účinku teploty na vyšetřované cementové kompozity a který souvisí se ztrátou různých forem vody. V případě sledovaných směsí lze pokles objemové hmotnosti charakterizovat jako postupný, bez výrazných rychlých poklesů. Po překročení hranice 500 °C až 600 °C již není pokles tak výrazný a lze tedy říci, že nejvýznamnější změny v hodnotách objemových hmotností je možné pozorovat mezi 300 °C až 500 °C. Ve všech sledovaných směsích se projevil trend poklesu objemové hmotnosti v souvislosti s přidávkou čedičových vláken (rozdíl mezi 0,5 % a 1,0 % použitých vláken Basaltex).

Z hlediska pevnosti v tahu za ohybu nastává největší změna u vzorků s čedičovými vlákny již po účinku teplotního zatížení v úrovni 300 °C. Dle různých zdrojů dochází v tomto teplotním rozmezí k dekompozici CAH_{10} , C_2AH_6 , AH_3 , C_3AH_6 [49, 50, 51]. V případě vláken keramických lze tuto hranici pozorovat v rozmezí 300 °C až 400 °C. Následný sestupný trend vlivem zvyšujícího se teplotního zatížení již není tak markantní a lze jej popsat jako postupný. Pevnost v tahu za ohybu tak postupně klesá až k nejnižším hodnotám odpovídajícím maximální intenzitě použitého teplotního zařízení (1000 °C). Trend poklesu pevnosti v tlaku se lišil v závislosti na materiálu použitých vláken. V případě čedičových vláken, bez rozlišení použitého množství a typu substituentu hlinitanového cementu, lze pozorovat největší pokles po účinku 300 °C a 400 °C. Obdobně jako v případě pevnosti v tahu za ohybu lze teplotní rozmezí cca 400 °C až 800 °C popsat velmi pozvolným poklesem sledovaného parametru. V případě použití keramických vláken je pokles plynulejší bez významnějších poklesů. Množství čedičových vláken hraje pozitivní roli v případě tahových a ohybových charakteristik, kdy zvýšení použitého množství vláken z 0,5 % na 1,0 % vede k nárůstu pevnosti v tahu za ohybu. Opačný trend můžeme pozorovat v případě tlakové pevnosti. Zvýšením množství čedičových vláken z 0,5 % na 1,0 % dojde k poklesu pevnosti v tlaku. Uvedený poznatek koresponduje s obecně známým jevem [173], kdy s postupně narůstající

dávkou vláken dochází k nárůstu tahových charakteristik, ovšem za současného poklesu pevnosti v tlaku. Závislost lomové energie koresponduje s klesajícím trendem popsáním v případě pevnosti v tahu za ohybu. I zde lze v případě čedičových vláken pozorovat výrazný propad hodnot následkem výpalu při 300 °C, který je následován velmi pozvolným poklesem až do maximální sledované teploty. V případě keramických vláken klesá lomová energie lineárně v rozmezí 300 °C až 700 °C, v následujícím teplotním intervalu 800 °C až 1000 °C je trend poklesu nižší. Zároveň je třeba zmínit, že kompozit obsahující čedičová vlákna dosahuje vyšších hodnot sledovaných parametrů než v případě kompozitu obsahujícího vlákna keramická.

4.5 STRUKTURA ČEDIČOVÝCH VLÁKEN

V souladu s hlavním zaměřením disertační práce a s cíli vytyčenými v úvodní kapitole představují mechanické parametry hlavní hodnotící parametr. Přes tuto převahu makroskopického hodnocení proběhla v rámci řešení disertační práce i analýza pomocí elektronové mikroskopie. Disertační práce již ve svém názvu klade důraz na použití vláken ve studovaných kompozitech. Povrch vláken může být ošetřen formou nanášení různých povlakových vrstev pro zlepšení soudržnosti s hydratačními produkty, a tím zlepšení mechanických parametrů výsledného kompozitu. Moderním způsobem úpravy vláken vybraných materiálů je ošetřování pomocí plazmatu [174]. Účinkem vysokých teplot při výpalu může dojít ke změně povrchové struktury samotného materiálu, ze kterého jsou vlákna vyrobena. Dále lze očekávat i změny v dodatečně aplikované vrstvě, zajišťující obvykle lepší soudržnost vláken s maticí kompozitu, případně dále povrchově modifikující vlákna (hydrofobizace, hydrofilizace atd.).

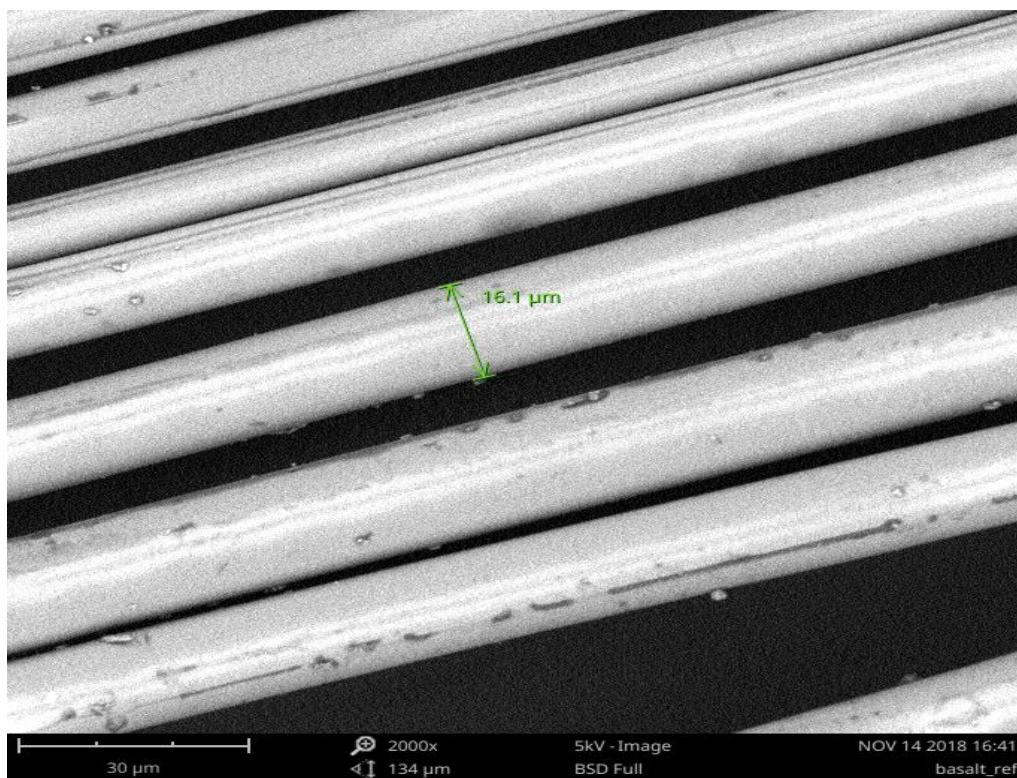
Z uvedených důvodů byla vlákna použita v rámci experimentálního programu disertační práce podrobena analýze pomocí elektronového mikroskopu. Pro zachování koherence s provedeným experimentálním programem byla vlákna vypálena ve stejném režimu, ve kterém probíhal výpal zkušebních vzorků, tzn. 600 °C a 1000 °C po dobu 3 hodin rychlostí 10 °C/min. Při hodnocení vláken po výpalu lze z makroskopického hlediska konstatovat, že keramická vlákna nevykazují vlivem 600 °C ani 1000 °C žádné vizuální změny. Stejně tak čedičová vlákna nejeví při teplotním zatížení v úrovni 600 °C žádnou vizuálně identifikovatelnou změnu. Účinek 1000 °C na čedičová vlákna lze pozorovat pouhým okem. Oproti původnímu šedo-hnědému zbarvení s lesklým povrchem dochází k barevné změně do světlých odstínů hnědé. **Obrázek 64** nabízí barevné srovnání čedičových vláken délky 12,7 mm teplotně nezatížených a vypálených při 1000 °C. Další zaznamenaná změna se týká povrchové struktury vláken. Během výpalu v elektrické peci se vlákna částečně v několika vrstvách překrývala. Po ukončení teplotního zatěžování vykazovaly jednotlivé vrstvy vláken vyšší vzájemnou provázanost (jevily známky „spečení“). Provázanost vláken nevykazovala trvalý charakter, ale rozmělněním mezi prsty se jednotlivá vlákna opět osamostatnila. Původ popisovaného jevu lze hledat v povrchové úpravě vláken, která vykazuje menší odolnost vůči účinkům vysokých teplot než samotný materiál vláken. Porovnáme-li odstín samostatně vypálených vláken a odstín vláken implementovaných do cementového kompozitu, zjistíme, že jsou identické.



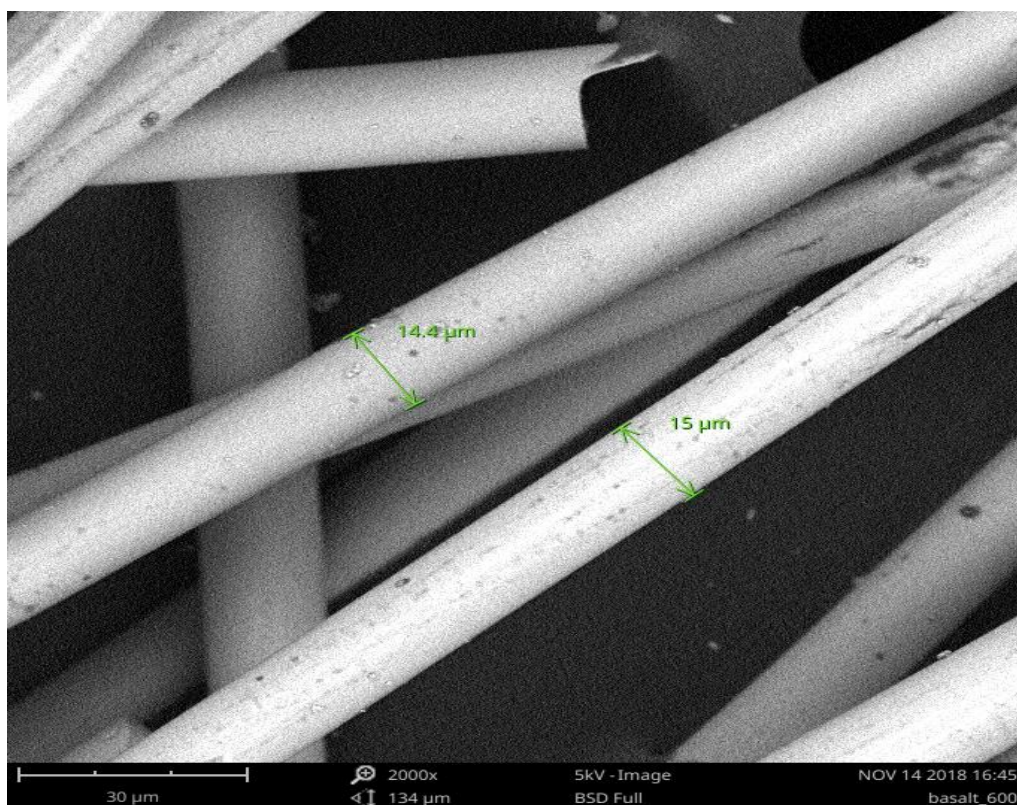
Obrázek 64 Barevné změny čedičových vláken – vlevo při laboratorních podmínkách a vpravo po výpalu při 1000 °C

4.5.1 Snímky z elektronového mikroskopu

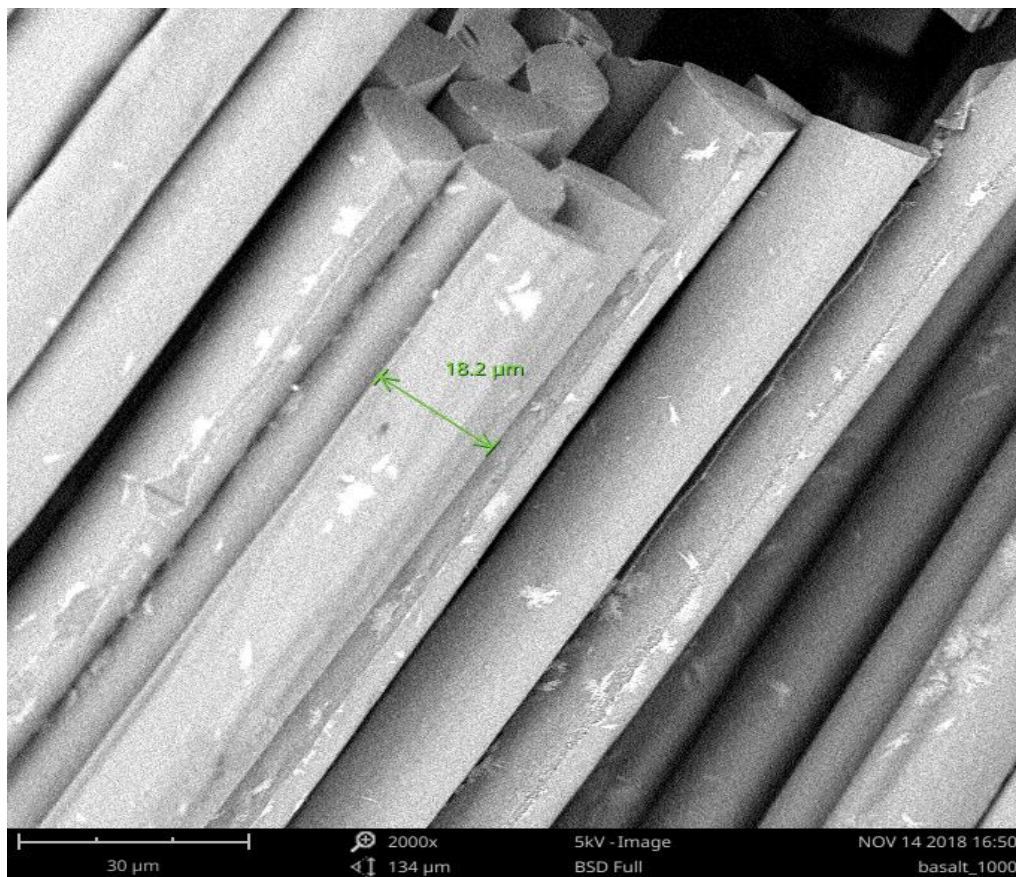
Detailní mikroskopická analýza proběhla pouze na čedičových vláknech, a to z důvodu jejich morfologie a makroskopicky pozorovatelných změn. Na obrázcích uvedených níže jsou snímky vláken ve všech teplotních režimech provedených v rámci experimentálního programu. Jedná se o referenční vlákna a dále vlákna vypálená při 600 °C a při 1000 °C. Pro možnost srovnání jsou všechny tři snímky provedeny se stejným zvětšením (2000×) a identickým nastavením použitého napětí v úrovni 5 kV.



Obrázek 65 Snímek čedičových vláken Basaltex, nezatížených vysokými teplotami, při zvětšení 2000×, včetně údaje o průměru vlákna.



Obrázek 66 Snímek čedičových vláken Basaltex po výpalu při 600 °C, při zvětšení 2000×, včetně údaje o průměru vlákna.



Obrázek 67 Snímek čedičových vláken Basaltex po výpalu při 1000 °C, při zvětšení 2000×, včetně údaje o průměru vlákna.

4.6 PÓROVÁ STRUKTURA

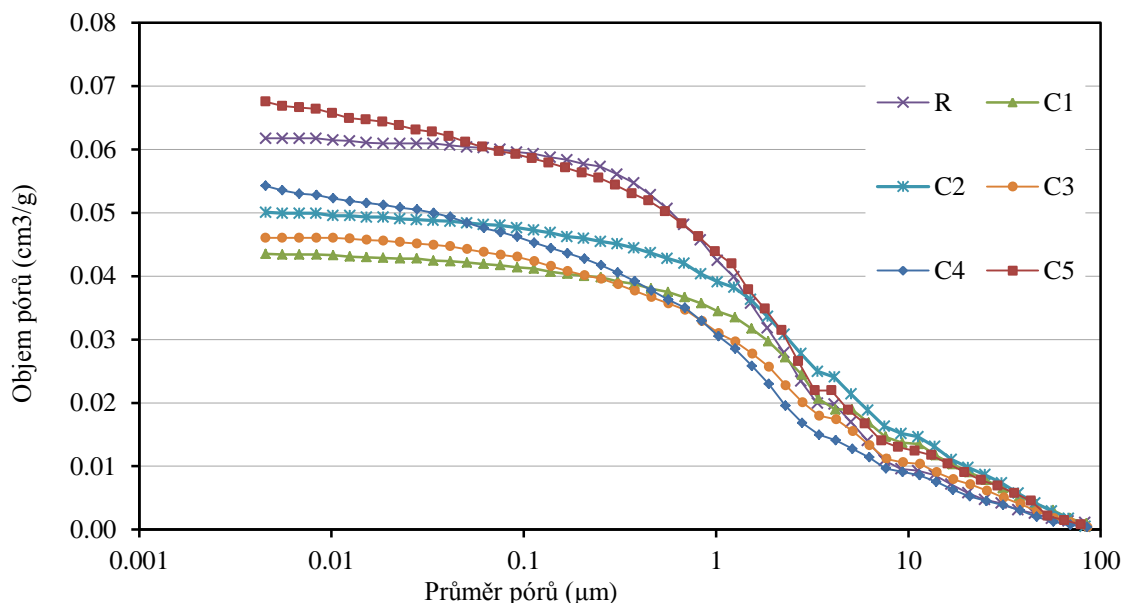
Použití metakaolinu či cihelného prachu modifikuje nejen mechanické a reologické parametry, ale má vliv i na vnitřní pórovou strukturu kompozitů, její charakter a objemové zastoupení pórů jednotlivých velikostí. Analýza vlivu odlišné substituce portlandského cementu cihelným prachem (od 0 % po 30 % hmotnostních procent) byla provedena Reitermanem et al. v [175]. Systém s portlandským cementem vykazoval maximální průměr pórů 1 μm . S nárůstem obsahu cihelného prachu dochází k nárůstu celkového objemu pórů o průměru 0,01 μm až 1 μm .

Obdobná analýza pórové struktury proběhla v rámci řešení experimentální části disertační práce, a to pro pojivový systém s hlinitanovým cementem s odlišným množstvím cihelného prachu. Pro samotnou zkoušku je třeba odebrat relativně malý vzorek (několik gramů) obsahující pojivový systém. Zhotovit cementové pasty s různým obsahem cihelného prachu bez vláken a čedičového kameniva při zachování hodnoty vodního součinitele 0,25 by nebylo možné z důvodu vysoké tekutosti. Vzorky použité pro analýzu pórové struktury tedy byly odebrány přímo z vlastního kompozitu, kdy po provedení tlakové zkoušky byla z poškozené části vyjmuta část pojivového tmelu a očištěna od kameniva. Stav pórové struktury byl vyšetřován pouze na vzorcích vysušených při 105 °C, nikoliv na vzorcích zatížených teplotním výpalem. Je zřejmé, že stav pórové struktury (velikost pórů, jejich zastoupení a vzájemné provázání) může být působícím teplotním zatížením ovlivněn. Vliv účinku vysokých teplot však nebyl předmětem této dílčí části. Sledován byl vliv množství cihelného prachu od 0 % po 25 % na pórovou strukturu pojivového systému na bázi hlinitanového

cementu v referenční teplotní úrovni. Níže uvedené výsledky byly rovněž publikovány autorem v rámci konferenčního příspěvku [176].

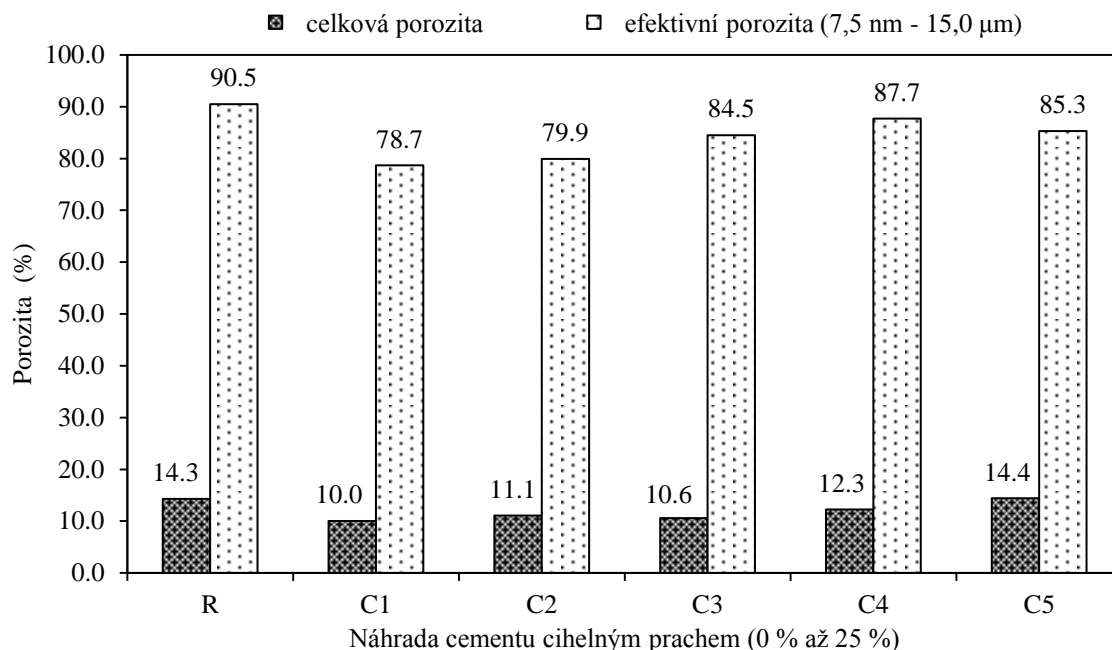
4.6.1 Výsledky

Kumulativní křivky studovaných směsí s odlišným obsahem hlinitanového cementu a cihelného prachu ilustruje následující **Obrázek 68**. Vzorek referenční – R obsahuje čistý hlinitanový cement, vzorek C5 představuje maximální substituci hlinitanového cementu ve výši 25 %.



Obrázek 68 Kumulativní křivky studovaných směsí.

Z uvedených křivek vyplývá velmi podobný charakter pórového systému pojivového systému studovaných směsí. Nejvyšší úroveň porosity charakterizuje směs s maximální dávkou cihelného prachu, kterou následuje směs referenční s pojivovým systémem tvořeným výhradně hlinitanovým cementem. Samotný cihelný prach má vysokou pórovitost, ovšem v menších dávkách vhodně doplňuje křivku zrnitosti. Z naměřených hodnot vyplývá, že aplikace jemně mletého cihelného prachu snižuje celkovou pórovitost. 20% náhrada hlinitanového cementu cihelným prachem sníží celkovou pórovitost na 86 %. Zároveň je třeba zmínit, že účinná (efektivní) pórovitost zůstala velmi podobná, jak lze vidět z **Obrázku 69**. Zřetelné snížení celkové pórovitosti na úroveň 77 % referenční směsi bylo dosaženo použitím 15 % cihelného prachu. Nejnižší dávka cihelného prachu snížila efektivní porozitu o 14 % (v rozmezí 7,5 nm až 15 μm).



Obrázek 69 Vyhodnocení celkové a efektivní porozity.

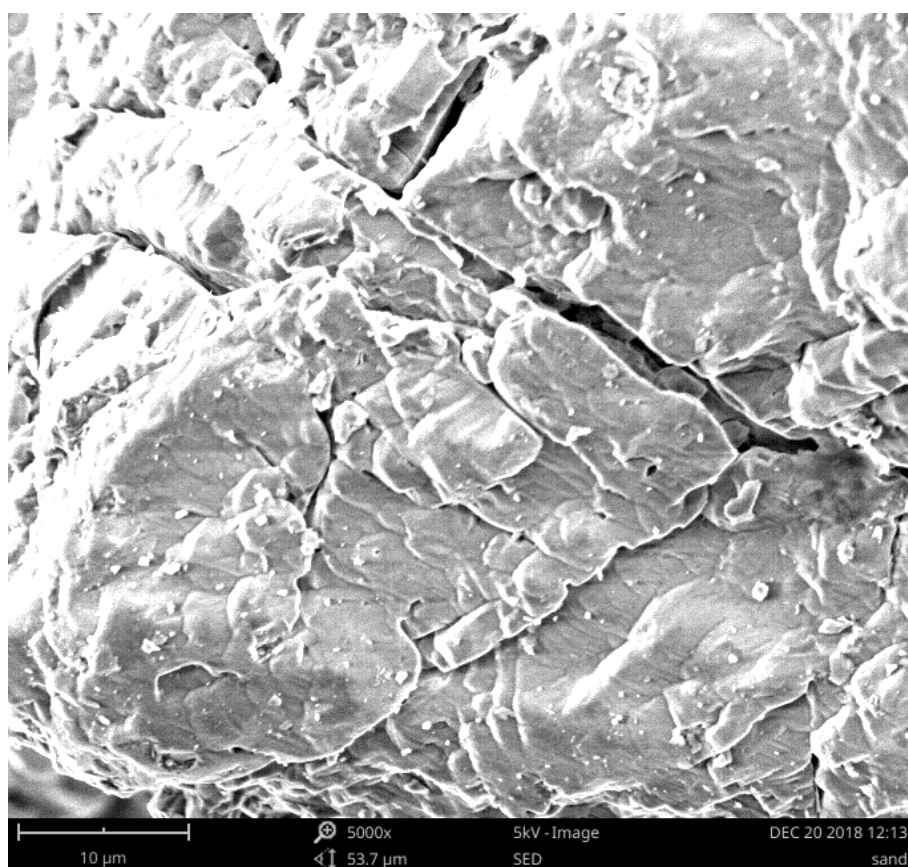
4.7 POROVNÁNÍ S NEŽÁRUVZDORNÝM KOMPOZITEM

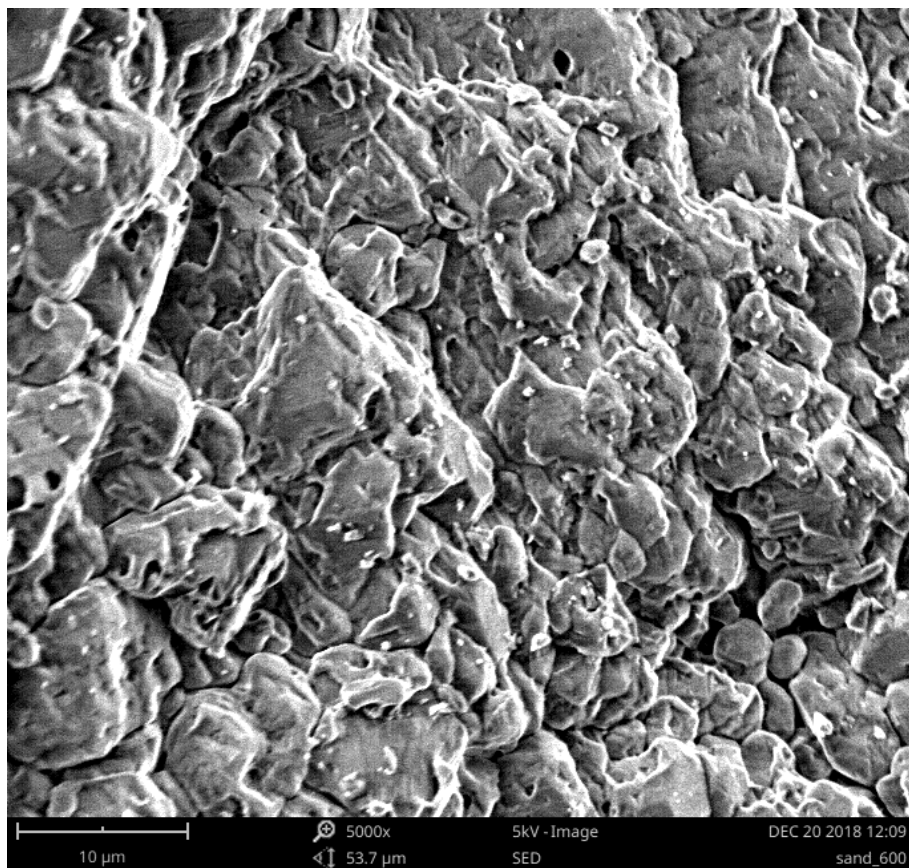
Jak bylo zmíněno již v předchozích odstavcích, disertační práce je zaměřena na téma vláknových kompozitů aplikovatelných v prostředí vysokých teplot. Pro ilustraci rozdílu mezi běžnými a žáruvzdornými kompozity byly vyrobeny tři série vzorků s různou kombinací žáruvzdorných a nežáruvzdorných komponent. Nutno podotknout, že níže uvedené směsi nebyly po záměně některých složek oproti původnímu složení nijak modifikovány za účelem dosažení co nejvýhodnějších vlastností, což znamená, že tyto směsi nebyly nijak optimalizovány z hlediska mechanických, případně reologických vlastností. Rovněž směsi s nežáruvzdornými komponenty byly vyztuženy vlákny, v tomto případě 0,5 % čedičových vláken v kombinaci dvou odlišných délek 6,35 mm a 12,7 mm (jednalo se o objemový podíl vláken). Jako nežáruvzdorné pojivo byl použit portlandský cement CEM 52,5 R, jako nežáruvzdorné plnivo kombinace čtyř frakcí křemičitého kameniva z produkce společnosti Sklopísek Střeleč, a. s. Složení tří použitých směsí je uvedeno v **Tabulce 9**. Množství vody a plastifikátoru bylo ve všech případech stejné a shodné s dříve použitými směsmi žáruvzdorného kompozitu. Jak vyplývá ze složení, do studovaných směsí nebyly začleněny jemné složky jako metakaolin či cihelný prach. Směs s označením A se skládala z žáruvzdorného pojivového systému z hlinitanového cementu, zatímco kamenivo bylo křemičité. O chování křemičitého kameniva a portlandského cementu za vysokých teplot a jeho objemových změnách je pojednáno v kapitole 2. Směs B obsahovala čistě nežáruvzdorné materiály – portlandský cement a křemičité kamenivo. Směs C charakterizuje kombinace žáruvzdorného kameniva a nežáruvzdorného pojiva.

Tabulka 9 Složení směsí kompozitů s nežáruvzdornými komponenty a porovnávaného žáruvzdorného kompozitu.

Složky	značení	C_0,5_R	A	B	C
		[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]
Cement	Secar®71	900	900	-	-
	52,5 R	-	-	900	900
Čedičové kamenivo	0-4 mm	880	-	-	880
	2-5 mm	220	-	-	220
Křemičité kamenivo	0,1-0,6 mm	-	465	465	-
	0,3-0,8 mm	-	297	297	-
	0,6-1,2 mm	-	234	234	-
	1,0-4,0 mm	-	168	168	-
Voda	pitná	225	225	225	225
Plastifikátor	SVC 1035	22,75	22,75	22,75	22,75
Čedičová vlákna 0,5%	6,35 mm a 12,7 mm	14,50	14,50	14,50	14,50

Pro křemičité kamenivo v prostředí vysokých teplot je důležitá teplota 573 °C, kdy dochází k přeměně z β -křemene (triklinická forma) na α -křemen (hexagonální) [106]. Uvedený jev provází nárůst objemu, který způsobuje zvýšení namáhání ve vnitřní struktuře. To má za následek porušení vnitřní integrity spojené s poklesem mechanických parametrů a nezřídka i soudržnosti (jak bylo popsáno v kapitole 2). Z uvedeného důvodu je použití daného typu kameniva zcela nevhodné pro potřeby aplikace v prostředí vysokých teplot. Jako kamenivo do referenčního (nežáruvzdorného) kompozitu se jeho použití však přímo nabízí.

**Obrázek 70** Snímek z elektronového mikroskopu – křemičité kamenivo bez zatížení teplotou.



Obrázek 71 Snímek z elektronového mikroskopu – křemičité kamenivo zatížené teplotou 600 °C.

Snímky použitého křemičitého kameniva v laboratorních podmínkách (**Obrázek 70**) a vypálených při 600 °C (**Obrázek 71**) byly pořízeny při identickém zvětšení 5000×. Snímek zabírá plochu cca 50×50 μm. Z daných snímků jsou patrné změny způsobené mineralogickou přeměnou výše zmíněných forem křemene. Povrch zrna křemičitého kameniva před výpalem je plochý a mírně zvlňný. Povrch zrna křemičitého kameniva vypáleného při 600 °C vykazuje výrazné změny ve struktuře. Původní povrch bez výrazných výstupků či jiných prostorových nerovností se vlivem přeměny formy křemene změnil. Výsledná struktura odpovídá předpokládanému nárůstu objemu hexagonální formy křemene a vykazuje lokální objemovou expanzi.

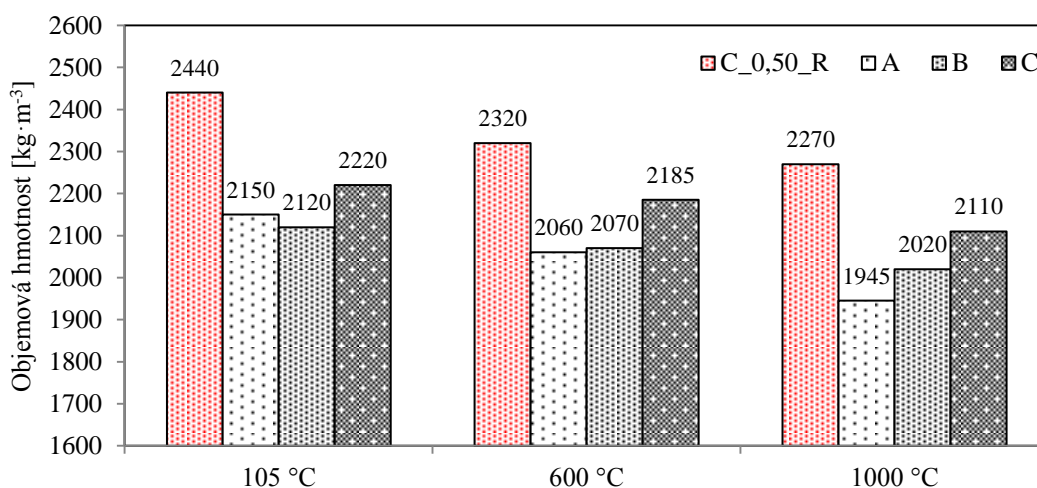
4.7.1 Výsledky

Obdobně jako v případě analýzy hlinitanového cementu (kap. 4.2) či základního programu (kap. 4.3) byly vyšetřovány identické parametry na směsích obsahujících nežáruvzdorné komponenty. Účinek vysokých teplot byl proveden opět ve dvou úrovních, a to 600 °C a 1000 °C. Jako srovnávací úroveň sloužily vzorky vysušené při 105 °C. Metodologické postupy byly opět v souladu s dosud provedenými a popsány zkouškami.

Tabulka 10 shrnuje hodnoty sledovaných parametrů v jednotlivých teplotních úrovních včetně procentuálního vyjádření změny příslušných parametrů následkem vystavení působení teplotního zatížení. Vyhodnocení jednotlivých sledovaných parametrů přináší samostatné grafy.

Tabulka 10 Vyhodnocené vlastnosti nežáruvzdorných kompozitů.

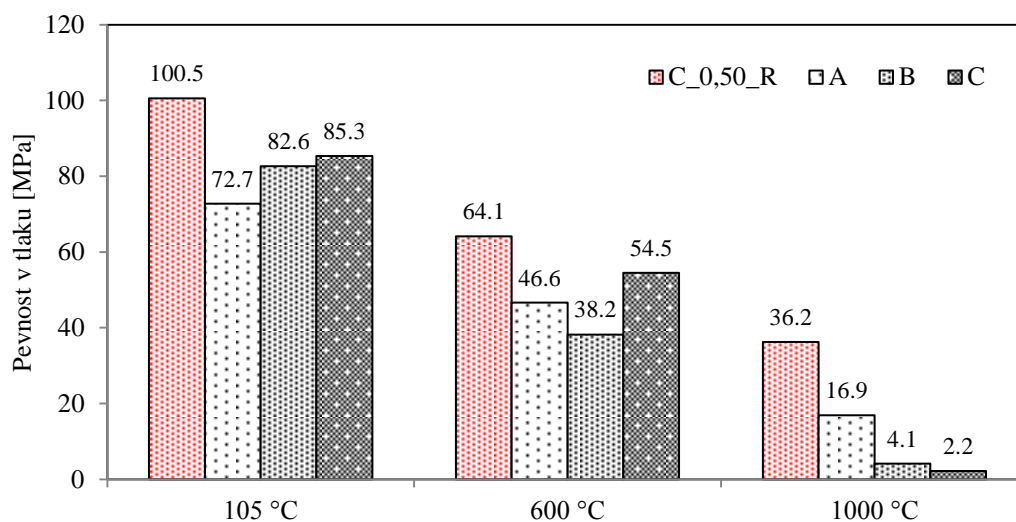
Parametr	Teplota		C_0,5_R	A	B	C
Objemová hmotnost	105 °C	[kg·m ⁻³]	2440	2150	2120	2290
		[%]	100	88,1	86,9	93,9
	600 °C	[kg·m ⁻³]	2320	2060	2070	2185
		[%]	100	88,8	89,2	94,2
	1000 °C	[kg·m ⁻³]	2270	1945	2020	2110
		[%]	100	85,7	88,9	93,0
Pevnost v tlaku	105 °C	[MPa]	100,5	72,7	82,6	85,3
		[%]	100	72,3	82,2	84,9
	600 °C	[MPa]	64,1	46,6	38,2	54,5
		[%]	100	72,7	59,6	85,0
	1000 °C	[MPa]	36,2	16,9	4,1	2,2
		[%]	100	46,7	11,3	6,1
Pevnost v tahu za ohybu	105 °C	[MPa]	11,9	8,3	16,5	9,7
		[%]	100	69,7	138,7	81,5
	600 °C	[MPa]	5,9	2,6	2,4	7,6
		[%]	100	44,1	40,7	128,8
	1000 °C	[MPa]	3,7	1,5	0,8	0,9
		[%]	100	40,5	21,6	91,9
Lomová energie	105 °C	[J·m ⁻²]	287,5	215,1	342,7	241,3
		[%]	100	100	100	100
	600 °C	[J·m ⁻²]	99,8	48,2	47,1	71,6
		[%]	100	22,4	13,7	29,7
	1000 °C	[J·m ⁻²]	88,1	20,5	12,3	14,6
		[%]	100	9,5	3,6	6,1



Obrázek 72 Porovnání objemových hmotností (vliv nežáruvzdorných materiálů).

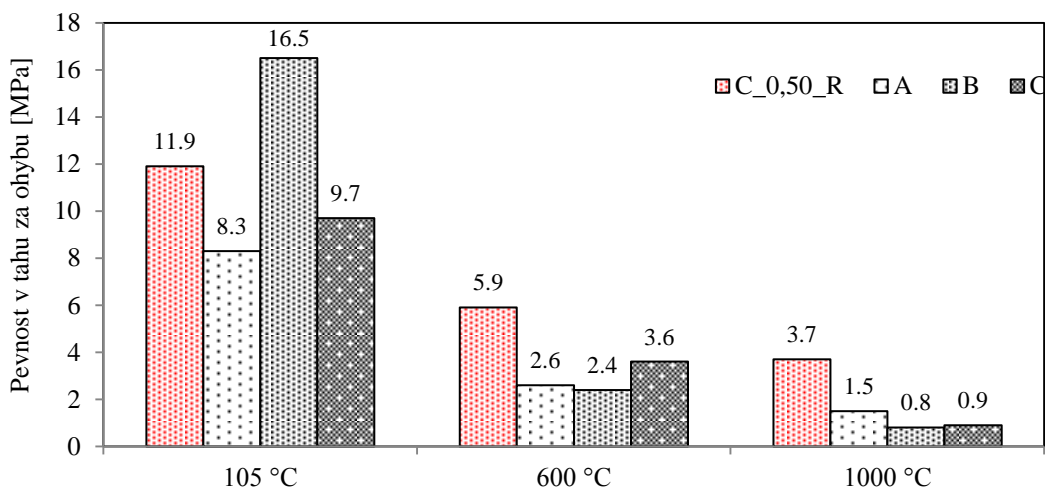
Výslednou objemovou hmotnost cementových kompozitů ovlivňuje celá řada faktorů od použitých materiálů (typ cementu, kameniva, přísady a příměsi) přes vlastní návrh směsi až po technologii výroby, ukládání a způsob hutnění. Objemová hmotnost použitého kameniva (2965 kg·m⁻³ v případě čedičového a 2600 kg·m⁻³ v případě křemičitého kameniva) představuje jeden z důležitých parametrů ovlivňujících výslednou objemovou hmotnost kompozitu, jak lze pozorovat v grafu na **Obrázku 72**. Nezávisle na účinku vysokých teplot dosahují směsi s čedičovým kamenivem vyšších hodnot objemových hmotností ve srovnání

se směsí A a B, kde bylo použito kameniva křemičitého. Změny objemové hmotnosti jsou vázány především na obsah různých forem vody ve struktuře vyšetřovaného materiálu. Obdobně jako v případech popsáných a uvedených dříve nebyla předmětem zájmu změna objemové hmotnosti v rozmezí laboratorních podmínek a vysušení při 105 °C. Jak bylo popsáno v kapitole 2, postupně narůstající teplota má vliv na chemické změny v hydratačních produktech pojivového systému na bázi portlandského cementu a rovněž tak v případě použití hlinitanového cementu. Vzhledem k odlišnému složení, mechanismu hydratace a výsledným hydratačním produktům obou použitých cementových pojiv je i jejich reakce na účinky vysokých teplot odlišná.



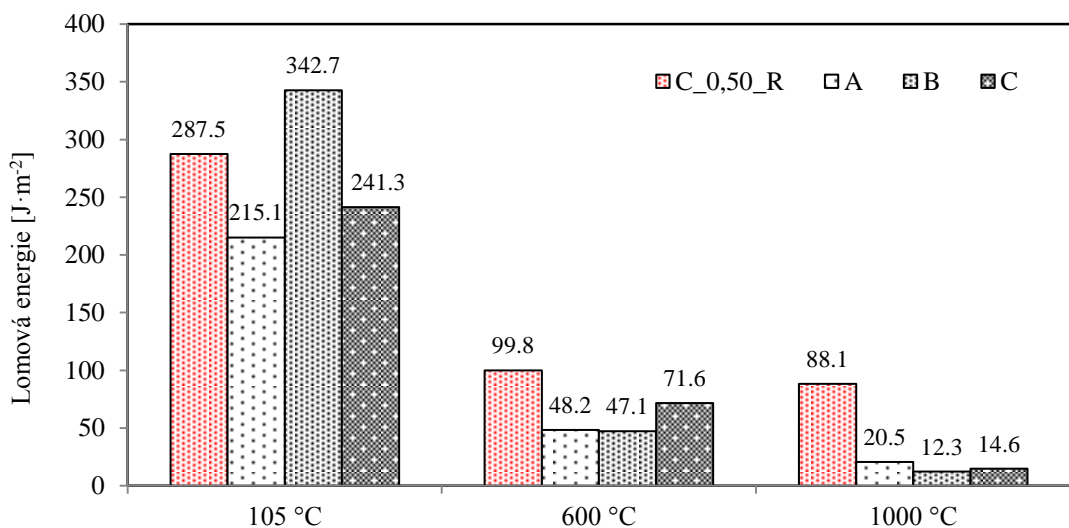
Obrázek 73 Porovnání pevností v tlaku (vliv nežáruvzdorných materiálů).

Účinek teplotního zatížení na pevnost v tlaku v závislosti na složení cementového kompozitu je graficky vyjádřen na **Obrázku 73**. Ve všech případech je dosažená pevnost v tlaku nejvyšší u žáruvzdorného kompozitu (C_0,5_R). Pevnosti vyšetřované na vzorcích vysušených při 105 °C dosahují rozptýlu od cca 100 MPa po cca 73 MPa. Účinek 600 °C se projeví poklesem pevnosti v tahu za ohybu především u směsí s křemičitém kamenivem. Nejmarkantnější vliv použití žáruvzdorných komponent na reziduální pevnost v tlaku ilustruje účinek 1000 °C. Směs A (žáruvzdorné pojivo a křemičité kamenivo) vykazovala přibližně poloviční (46,7 %) pevnost oproti směsi z plně žáruvzdorných komponent (C_0,5_R). Směsi B a C s pojivovým systémem z portlandského cementu vykazovaly cca desetinou pevnost ve srovnání se směsí C_0,5_R (11,3 % resp. 6,1 %). Rovněž při makroskopickém pozorování povrchu, struktury a soudržnosti vykazovaly dvě posledně jmenované směsi z čistě nežáruvzdorných komponent znaky porušení samotné struktury, povrchových trhlin, drobení a odpadávání volných částí atd.



Obrázek 74 Porovnání pevností v tahu za ohybu (vliv nežáruvzdorných materiálů).

Pevnost v tahu za ohybu představuje parametr, který je obvykle citlivější na vliv teplotního zatížení, tj. dochází k většímu poklesu sledované charakteristiky. Kromě změn v mikrostruktuře můžeme tento jev vysvětlit rovněž principem ohybové zkoušky, kdy i nevýrazná trhlinka může způsobit výrazný pokles pevnosti v tahu za ohybu. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu dosáhla směs B (kombinace portlandského cementu a křemičitého kameniva), která svým složením a charakterem odpovídala vysokohodnotnému jemnozrnnému cementovému kompozitu. Tento rozdíl oproti sledované směsi C_0,5_R je cca 28 %. Pevnosti v tahu za ohybu směsí A a C jsou na nižší úrovni oproti sledované žáruvzdorné směsi (nižší o 30 %, resp. 18,5 %). Po výpalu při 600 °C a rovněž při 1000 °C jsou vypočtené pevnosti u žáruvzdorné směsi vždy vyšší než v případě zbývajících třech směsí (různá kombinace žáruvzdorných a nežárudorných komponent). V číselném a rovněž grafickém vyjádření (**Obrázek 74**) můžeme pozorovat propad pevností těch směsí, u kterých bylo jako plnivo použito křemičité kamenivo. Znovu se potvrdil fenomén popsáný v úvodní rešerši, zahrnující konverzi křemene způsobující výrazný pokles mechanických charakteristik. Zajímavé jsou relativně vysoké residuální pevnosti po výpalu při 600 °C dosažené u směsi C za požití portlandského cementu a čedičového kameniva. V souladu s pozorovaným trendem poklesu pevnosti v tahu za ohybu lze pozorovat i pokles lomové energie, jak vyjadřuje **Obrázek 7**.



Obrázek 75 Porovnání lomových energií (vliv nežárudorných materiálů).

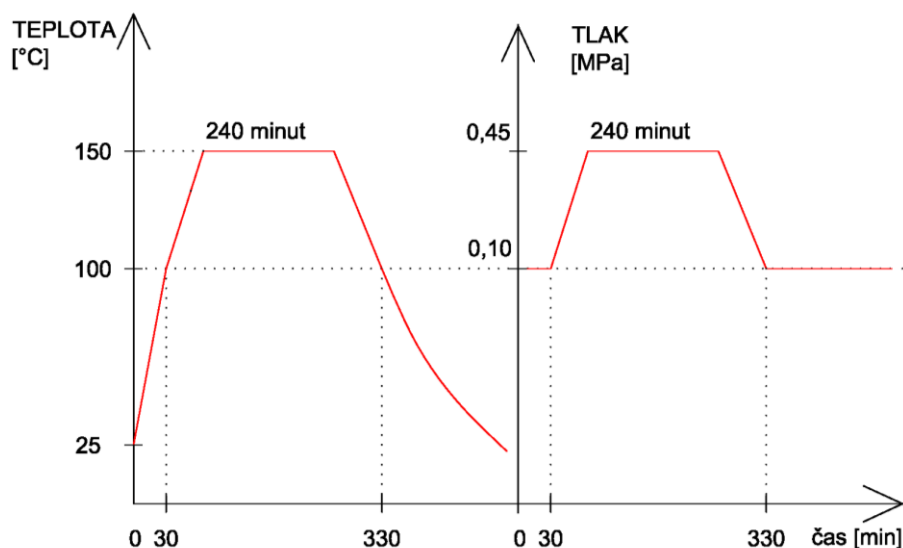
4.7.2 Dílčí závěr

Pro srovnání vlivu nežáruvzdorných materiálů byla provedena dílčí část experimentálního programu. Na základě zjištěných hodnot sledovaných parametrů lze dovodit následující závěry. Nejnižších hodnot objemových hmotností, nezávisle na intenzitě teplotního zatížení, bylo dosaženo při použití křemičitého kameniva (nižší objemová hmotnost křemičitého kameniva ve srovnání s kamenivem čedičovým). Z hlediska tlakových pevností vzorků vypálených při 600 °C je možné pozorovat výrazný pokles v případě použití obou nežáruvzdorných komponent (portlandský cement a křemičité kamenivo – směs B). Na hodnotách pevností v tlaku u směsí s portlandským cementem (B a C) se projevil destruktivní účinek výpalu při 1000 °C. Uvedené hodnoty jsou zlomky původních pevností odpovídajících referenční teplotní úrovni. Rovněž z hlediska vizuálního makroskopického hodnocení byly dané vzorky narušené a samovolně z nich odpadávaly fragmenty kameniva i cementového tmelu. Kromě směsi B v referenční teplotní úrovni (křemičité kamenivo a portlandský cement) dosáhl žáruvzdorný kompozit vždy nejvyšších hodnot pevnosti v tahu za ohybu.

Uvedené výsledky potvrdily známý fakt nevhodnosti použití křemičitého kameniva do cementových kompozitů vystavených prostředí, kde jsou očekávány teploty nad 600 °C. Přeměna triklinické formy křemene na hexagonální formu doprovázená objemovými změnami byla prokázána snímkem z elektronového mikroskopu. Při 1000 °C bylo možné pozorovat rozklad hydraulické vazby a soudržnosti kompozitu, jehož pojivový systém byl založen na portlandském cementu.

4.8 HYDROTERMÁLNÍ OŠETŘOVÁNÍ

Použité autoklávovací zařízení ATH-70 umožňuje nastavit hodnotu tlaku, jemuž pak odpovídá příslušná teplota. Po zvážení dosažených mechanických vlastností získaných v rámci pilotního výzkumu a s přihlédnutím k technickým parametrům autoklávu byla zvolena hodnota tlaku 0,45 MPa, které odpovídala teplota 150 °C. Druhým důležitým parametrem je doba trvání hydrotermálního ošetřování, v našem případě 4 hodiny. **Obrázek 76** popisuje průběh hydrotermálního ošetřování aplikovaný v rámci experimentálního programu. Jedná se o časový průběh tlaku a časový průběh teploty. Významným bodem v uvedených grafech je hranice 100 °C, kdy byl uzavřen ventil spojující tlakovou komoru a vnější prostředí, což způsobilo nárůst tlaku a s tím související růst teploty až do nastavené maximální úrovně. Okamžik vypnutí zdroje tepelné energie a zapnutí větrání představuje druhý významný bod znamenající pokles tlaku a teploty. Tlak poklesl na atmosférickou úroveň a teplota uvnitř autoklávu a v exteriéru se vyrovnala.



Obrázek 76 Schéma tlaku a teploty v průběhu hydrotermálního ošetřování.

Zbývajícím parametrem, chceme-li okrajovou podmínkou, je stáří vzorků vkládaných do autoklávu. Za stáří vzorků považujeme dobu uplynulou od okamžiku prvního kontaktu záměsové vody a cementu. Právě stáří představovalo parametr, který byl proměnlivý a jehož vliv byl rovněž vyšetřován. Hydrotermální proces lze charakterizovat jako energeticky a časově náročný. Z popsaných důvodů neproběhlo autoklávování na všech dříve popsaných směsích žáruvzdorného kompozitu s jednotlivými nuancemi ve složení (množství a typ použitých vláken, cihelného prachu, metakaolinu atd.).

4.8.1 Kompozit s hlinitanovým cementem bez příměsí

Prvotní experimenty s hydrotermálním ošetřováním byly zaměřeny na žáruvzdorný kompozit, v jehož složení se nevyskytovala žádná z používaných jemných složek (metakaolin ani cihelný prach). V rámci těchto experimentů byl sledován pouze vliv čedičových vláken na výsledné mechanické a základní vlastnosti směsí C_0,0_R a C_0,5_R. Tyto výsledky byly rovněž publikovány v rámci konferenčního příspěvku [178]. Výsledné hodnoty vyšetřovaných parametrů v souladu s dosud provedenými experimenty shrnují následující tabulky (**Tabulka 11** a **Tabulka 12**). Autoklávování probíhalo na vzorcích ve stáří 36 hodin. Dosažené výsledky lze charakterizovat výrazným nárůstem všech sledovaných mechanických parametrů a rovněž znatelným nárůstem objemové hmotnosti. Tlakové pevnosti autoklávovaných vzorků dosahují (vyjma výpalu při 600 °C) velmi podobných hodnot. Pozitivní účinek hydrotermálních podmínek reflektují především dosažené pevnosti tahu za ohybu, což je v souladu s obecnými znalostmi publikovanými ve více odborných pracích [179]. Porovnáme-li hodnoty pevnosti v tahu za ohybu u vzorků pouze vysušených, zjistíme, že v případě směsi obsahující vlákna se hodnoty mezi autoklávovanými vzorky a referenčními vzorky ošetřovanými v laboratorních podmínkách příliš neliší (rozdíl odpovídá cca 3 % ve prospěch autoklávovaných vzorků). Účinek hydrotermálních podmínek ošetřování v případě směsi s 0,5 % čedičových vláken se pozitivně projeví především v případě residuální pevnosti v tahu za ohybu na vzorcích zatížených 600 °C a 1000 °C (17% nárůst, resp. 65% nárůst). Ještě významnější nárůst bylo možné pozorovat na vzorcích bez vláken, kdy rozdíl ve prospěch autoklávovaných činil 85 %, 180 % a 145 % (v pořadí 105 °C, 600 °C a 1000 °C). Obdobně bylo možné pozorovat nárůst tlakové pevnosti autoklávovaných vzorků. U vzorků s čedičovými vlákny se hydrotermální podmínky projeví nárůstem o 48 %, 16 %

resp. 64 % (105 °C, 600 °C a 1000 °C). Směs bez čedičových vláken lze charakterizovat nárůstem tlakové pevnosti v případě hydrotermálního ošetřování v úrovni 224 %, 229 % a 224 % (105 °C, 600 °C a 1000 °C). V souvislosti s hutnější strukturou formovanou v autoklávu lze pozorovat i nárůst objemové hmotnosti, především u směsi bez čedičových vláken, a to o průměrných 6 %. Rovněž je korektní poznamenat, že referenční mechanické hodnoty základní směsi (C_0,0_R; tj. čistý hlinitanový cement, bez vláken) nedosahovaly kvalit a hodnot směsi s obsahem čedičových či keramických vláken s obsahem cca 15 % až 25 % metakaolinu či cihelného prachu. V uvedeném důvodu lze rovněž hledat vysvětlení pro značně markantní nárůst sledovaných parametrů u hydrotermálně ošetřovaných vzorků. Dále je nutné zmínit, že veškeré parametry popsané a hodnocené v předchozích řádcích a kvantifikované v **Tabulce 11** a **Tabulce 12** byly získány na základě zkoušek provedených na vzorcích z prvotních experimentů s autoklávem. Především samotné hydrotermální ošetřování započalo příliš brzy, a to ve stáří 24 hodin. Vzorky vkládané do autoklávu ještě nedosahovaly dostatečné pevnosti a objemové stability, což způsobilo změnu tvaru – vzorek po vyjmutí z autoklávu vykazoval tvarové deformace. Vzhledem k použitým směsím C_0,0_R a C_0,5_R (tj. bez přídavku metakaolinu či cihelného prachu) a s přihlédnutím k relativně nízkému obsahu čedičových vláken byly dané směsi značně náchylné k segregaci kameniva a rovněž k tzv. krvácení. Vybrané směsi použité v navazující prohlubující části experimentálního programu uvedeným fenoménem netrpěly. Zmíněný negativní fenomén (tj. uvolnění části technologické vody) však na druhé straně umožnil průběh autoklávování za podmínek větší přítomnosti vody.

Tabulka 11 Výsledky směsi bez obsahu cihelného prachu či metakaolinu.

Směs	105 °C		600 °C		1000 °C	
	ρ [kg·m ⁻³]	G_f [J·m ⁻²]	ρ [kg·m ⁻³]	G_f [J·m ⁻²]	ρ [kg·m ⁻³]	G_f [J·m ⁻²]
C_0,0_R	2540	304,1	2345	207,9	2300	124,0
C_0,5_R	2450	324,9	2190	214,7	2180	194,6

Tabulka 12 Výsledky směsi bez obsahu cihelného prachu či metakaolinu.

Směs	105 °C		600 °C		1000 °C	
	f_c [MPa]	f_t [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]
C_0,0_R	152,1	9,6	102,4	5,6	61,1	3,0
C_0,5_R	148,9	12,3	73,0	6,9	59,3	6,1

Na základě multikriteriálního hodnocení (dosažené mechanické vlastnosti, zpracovatelnost, chování čerstvé směsi, reziduální mechanické vlastnosti po účinku vysokých teplot) proběhl výběr několika směsí, které byly podrobeny navazujícím analýzám a experimentům. Detailní popis kritérií a rovněž soupis vybraných směsí uvádí přehled v kapitole 4.3. Pro další experimenty s hydrotermálním ošetřováním byly vybrány dvě směsi obsahující maximální používanou dávku cihelného prachu (225 kg·m⁻³) a vzájemně se lišící materiálem použitých vláken (1,0 % čedičových vláken a 4 % keramických vláken).

4.8.2 Kompozit s čedičovými vlákny

Každý cementový kompozit v závislosti na pojivovém systému a použitých přísadách (plastifikátory, urychlovače či zpomalovače tuhnutí atp.) hydratuje s odlišnou kinetikou, a tudíž bude i odlišně reagovat na hydrotermální podmínky. Důležitou roli hraje i stáří vzorků, ve kterém jsou uloženy do autoklávu, tj. doba, která uplynula od okamžiku prvního kontaktu vody s cementem do spuštění autoklávu. Aplikujeme-li hydrotermální podmínky v době, kdy již započalo tuhnutí, ale tvrdnutí ještě nedosáhlo úrovně, kdy je vzniklá struktura schopna odolávat tlaku v autoklávu, dojde ke vzniku trhlin (makroskopických i mikroskopických). Finální pevnost je pak nižší než u srovnávaných vzorků ošetřovaných v laboratorních podmínkách.

Analýza vlivu stáří vzorků ošetřovaných v autoklávu probíhala na směsi s označením C_1,0_C5 (1,0 % čedičových vláken a $225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ cihelného prachu).

Vzhledem k rychlosti tuhnutí a tvrdnutí použitého žáruvzdorného kompozitu se omezil časový interval počátku autoklávování na stáří vzorků 24 hodin až 48 hodin, odstupňovaný po 6 hodinách (svůj vliv zde rovněž hrálo množství použité plastifikační přísady). O vlivu času a tlaku na výsledné mechanické parametry RPC hovoří Yazici et al. v [179]. Obdobně Palou et al v [146] sledoval vlákny vyztužený kompozit v hydrotermálních podmínkách. Například v autorem prováděném výzkumu z oblasti jemnozrnného HPC probíhalo hydrotermální ošetřování ve stáří vzorku 12 hodin až 24 hodin, odstupňovaném po třech hodinách [139]. Pro všechny dále uvedené a popisované vzorky platí, že byly ošetřovány v autoklávu, který byl nastaven na 0,45 MPa. Této hodnotě tlaku odpovídala teplota 150 °C.

4.8.2.1 Výsledky

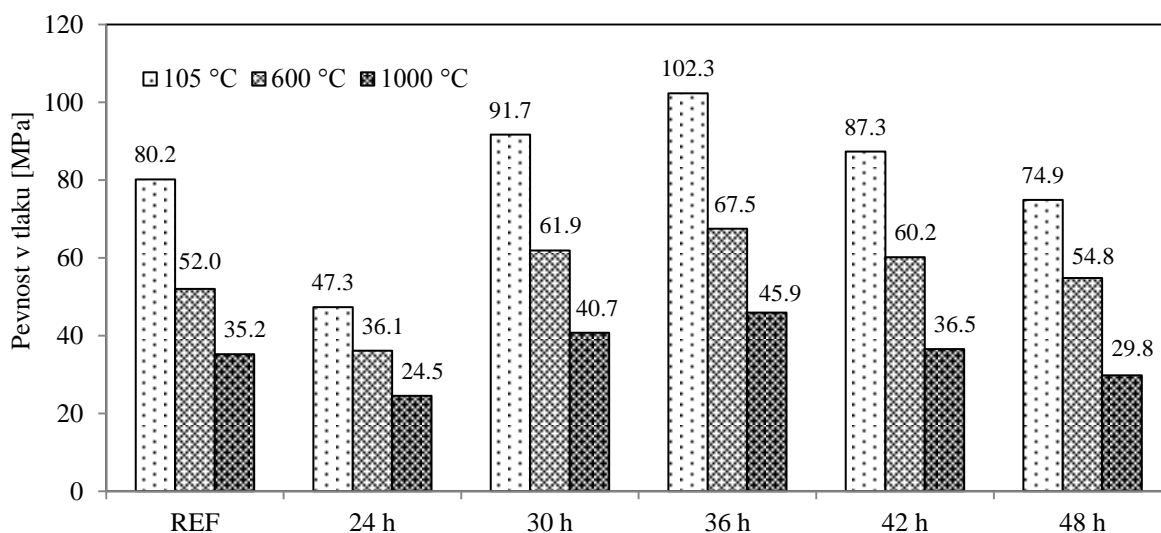
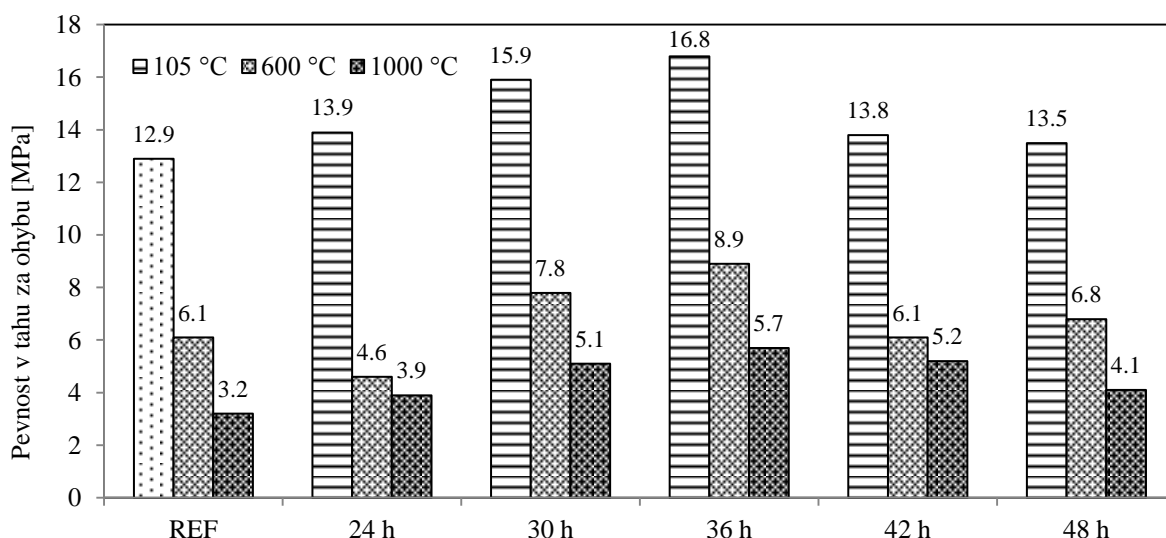
Účinek hydrotermálního ošetřování žáruvzdorného kompozitu s čedičovými vlákny (1,0 %) lze vyjádřit pomocí sledovaných parametrů (objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a lomová energie). Konkrétní hodnoty sledovaných parametrů uvádí **Tabulka 13** a **Tabulka 14**, a to včetně reziduálních hodnot po účinku působení teplotního zatížení ve stejné úrovni jako v předchozích případech, tj. 600 °C a 1000 °C. Základní mechanické parametry byly rovněž graficky vyhodnoceny pro porovnání vlivu hydrotermálních podmínek a především z důvodu evaluace vhodného stáří vzorků při začátku autoklávovacího procesu. Grafy na **Obrázku 77** a **78** znázorňují hodnoty pevnosti v tlaku, resp. pevnosti v tahu za ohybu, kdy je ke každému vyšetřovanému stáří vzorku znázorněna hodnota příslušného parametru ve třech sledovaných teplotních režimech.

Tabulka 13 Výsledky hydrotermálního ošetřování směsi s cihelným prachem a čedičovými vlákny.

Stáří	105 °C		600 °C		1000 °C	
	ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	G_f [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$]	ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	G_f [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$]	ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	G_f [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$]
REF	2250	238,8	2105	94,7	2065	72,9
24 h	2350	214,6	2130	114,1	2055	96,0
30 h	2375	294,7	2230	184,2	2185	184,3
36 h	2365	346,5	2220	214,6	2165	184,1
42 h	2380	238,1	2200	174,6	2195	164,7
48 h	2375	246,8	2195	190,1	2130	146,8

Tabulka 14 Výsledky hydrotermálního ošetřování směsi s cihelným prachem a čedičovými vlákny.

Stáří	105 °C		600 °C		1000 °C	
	f_c [MPa]	f_t [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]
REF	80,2 100 %	12,9 100 %	52,0 100 %	6,1 100 %	35,2 100 %	3,2 100 %
24 h	47,3 59,0 %	13,9 107,8 %	36,1 69,4 %	4,6 75,4 %	24,5 69,6 %	3,9 121,9 %
30 h	91,7 114,3 %	15,9 123,6 %	61,9 119,0 %	7,8 127,9 %	40,7 115,6 %	5,1 159,4 %
36 h	102,3 127,6 %	16,8 130,2 %	67,5 129,8 %	8,9 145,9 %	45,9 141,2 %	5,7 178,1 %
42 h	87,3 108,9 %	13,8 107,0 %	60,2 115,8 %	6,1 100 %	36,5 103,7 %	5,2 162,5 %
48 h	74,9 93,4 %	13,5 104,7 %	54,8 105,4 %	6,8 111,5 %	29,8 84,6 %	4,1 128,1 %

**Obrázek 77** Vyhodnocení tlakových pevností vzorků ošetřovaných v hydrotermálních podmínkách ve studovaných teplotních režimech.**Obrázek 78** Vyhodnocení pevností v tahu za ohybu vzorků ošetřovaných v hydrotermálních podmínkách ve studovaných teplotních režimech.

4.8.3 Keramická vlákna

Výše uvedená kapitola popisuje vliv stárí vzorků s konstantním množstvím cihelného prachu, ve kterých byly aplikovány hydrotermální podmínky ošetřování. Výsledkem bylo mimo jiné zjištění optimálního stárí pro aplikaci hydrotermálních podmínek. Popisované výsledky uvedl autor rovněž v konferenčním příspěvku [180]. Následující kapitola uvádí základní a mechanické charakteristiky směsí s rozdílným obsahem cihelného prachu ošetřované v autoklávu, ve kterých byla místo čedičových vláken použita vybraná vlákna keramická, a to v množství 4 % hmotnosti. Tato data byla autorem publikována jako část rozsáhlejšího experimentálního programu v rámci publikace v časopisu *Advances in Civil Engineerings* [152]. Hydrotermální proces v případě kompozitu s keramickými vlákny s variabilním zastoupením cihelného prachu započal po uplynutí 36 hodin od prvního kontaktu vody s cementem, a to v souladu s předchozími experimenty.

4.8.3.1 Výsledky

Hodnoty vyšetřovaných parametrů potvrzují v téměř všech případech pozitivní vliv hydrotermálního ošetřování. Hodnoty objemové hmotnosti a lomové energie autoklávovaných vzorků s keramickými vlákny a variabilním obsahem cihelného prachu v závislosti na teplotním zatížení uvádí **Tabulka 15**. Hodnoty pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu stejných směsí doplňuje **Tabulka 16**. Následující porovnání vymezuje výsledky odpovídající autoklávovaným vzorkům vůči vzorkům ošetřovaným za standardního tlaku a teploty. Vzorky vysušené vykazují vyšší hodnoty objemové hmotnosti, zatímco v případě vzorků vystavených teplotnímu zatížení již můžeme identifikovat rovněž vzorky s nižší objemovou hmotností. Nárůst či naopak úbytek objemové hmotnosti vlivem autoklávování dosahuje maximálně 5 %. Nejvýznamnější a nejmarkantnější účinek hydrotermálního způsobu ošetřování lze pozorovat v případě pevnosti v tahu za ohybu. Tento mechanický parametr je v některých případech až dvojnásobný v porovnání s referenčními vzorky. Pozitivní efekt hydrotermálního ošetřování na tahové vlastnosti se projevil rovněž na vzorcích zatížených vysokými teplotami, a to i v maximální teplotní úrovni 1000 °C. V souvislosti s vyššími dosaženými pevnostmi v tahu za ohybu lze pozorovat i vyšší hodnoty lomových energií. Popsaný pozitivní efekt na uvedené vlastnosti koresponduje s poznatky uvedenými v odborné literatuře (viz kapitola 2), kdy hydratační produkty vznikající v hydrotermálních podmínkách se odlišují od hydratačních produktů odpovídajících běžným podmínkám. Odlišné hydratační produkty se vyznačují lepší soudržností s povrchem vláken obsažených v kompozitu. Právě uvedená vyšší soudržnost pozitivně ovlivňuje výsledné tahové charakteristiky, především jejich reziduální hodnoty po účinku vysokých teplot. Naopak tlakové pevnosti lze charakterizovat opačným trendem, kdy vzorky vysušené a vzorky vypálené při 600 °C dosahují podobných, případně nižších hodnot. Teprve v případě reziduálních pevností v tlaku po teplotním zatížení v úrovni 1000 °C se projevil pozitivní efekt hydrotermálního způsobu ošetřování. Dále lze pozorovat klesající trend hodnot objemových hmotností s rostoucím množstvím cihelného prachu. Jak vyplývá z předchozích kapitol, uvedený jev byl identifikován i v případě vzorků ošetřovaných při standardních atmosférických podmínkách a souvisí s nižší objemovou hmotností cihelného prachu ve srovnání s hlinitanovým cementem.

Tabulka 15 Hodnoty objemové hmotnosti a lomové energie autoklávovaných vzorků s keramickými vlákny.

Množství cihelného prachu [%]	105 °C		600 °C		1000 °C	
	ρ [kg·m ⁻³]	G_f [J·m ⁻²]	ρ [kg·m ⁻³]	G_f [J·m ⁻²]	ρ [kg·m ⁻³]	G_f [J·m ⁻²]
0	2400	294,5	2170	146,3	2130	137,4
5	2390	205,4	2145	178,8	2130	123,1
10	2380	184,6	2135	157,9	2110	143,6
15	2310	131,3	2105	160,6	2085	96,0
20	2305	142,3	2090	139,3	2085	118,2
25	2350	116,2	2155	116,6	2110	125,6

Tabulka 16 Hodnoty pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu autoklávovaných vzorků s keramickými vlákny.

Množství cihelného prachu [%]	105 °C		600 °C		1000 °C	
	f_c [MPa]	f_t [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]
0	91,3	20,4	72,4	6,1	53,0	4,6
5	53,7	17,5	46,5	4,1	39,7	3,2
10	64,9	16,8	58,5	6,0	42,6	3,9
15	59,5	14,2	40,8	5,0	34,6	3,3
20	46,8	15,9	37,9	5,3	26,0	4,4
25	44,7	14,0	35,6	5,7	27,2	4,1

4.8.4 Závěry z hydrotermálního ošetřování

Nejvyšších hodnot vyšetřovaných mechanických parametrů dosáhly vzorky zhotovené ze směsi bez cihelného prachu. Zde se však negativně projevily výrazné objemové a tvarové deformace, kvůli kterým není možné uvedené výsledky považovat za prakticky využitelné. Na základě provedených experimentů s kompozitem C_1,0_C25 (1,0 % čedičových vláken a 225 kg·m⁻³ cihelného prachu) lze konstatovat, že optimální čas pro počátek hydrotermálního ošetřování je 36 hodin od zamíchání směsi. U sledovaných směsí se projevila efekt hydrotermálních podmínek nárůstem hodnot objemových hmotností oproti vzorkům ošetřovaným při laboratorních podmínkách. Přínos hydrotermálních podmínek se projevila především v kontextu reziduálních parametrů vyšetřovaných na vzorcích podrobených teplotnímu zatížení. V případě studia vlivu celkové substituce hlinitanového cementu cihelným prachem na směsi s konstantním množstvím keramických vláken byly nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku dosaženy na směsi bez cihelného prachu. S klesajícím množstvím hlinitanového cementu rovněž klesaly hodnoty vyšetřovaných parametrů (vzorky nezátížené vysokými teplotami), především pevností v tahu za ohybu. Ve všech teplotních režimech klesaly absolutní hodnoty tlakových pevností s rostoucím obsahem cihelného prachu. Významné jsou hodnoty reziduálních pevností v tlaku po účinku teplotního zatížení v úrovni 1000 °C. Předpoklad výborných tahových charakteristik potvrdily

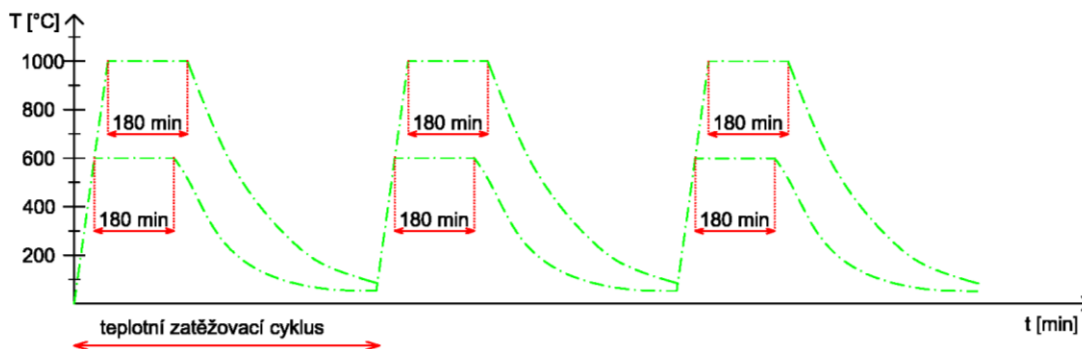
rovněž hodnoty pevnosti v tahu za ohybu, které se v teplotním intervalu 600 °C až 1000 °C výrazně nelišily. Největší pokles pevnosti v tahu za ohybu se odehrál již po účinku 600 °C.

4.9 DESKOVÉ VZORKY

Na základě provedeného základního experimentálního programu spočívajícího v analýze vlivu množství a typu vláken a rovněž z hlediska typu a množství jemnozrnné puculanové příměsi byly vybrány tři směsi s maximální dávkou cihelného prachu ($225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a čedičovými vlákny (0,25 %, 0,5 % a 1,0 %). O jejich volbě rozhodly především hodnoty mechanických vlastností, zpracovatelnost čerstvé směsi a dále akcent na využití odpadního jemnozrnného cihelného materiálu. Jedná se o směsi s maximální dávkou cihelného prachu ve výši $225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ vzájemně se lišící množstvím čedičových vláken (0,25 %, 0,5 % a 1,0 %). Ověření chování navrženého kompozitu na vzorcích větších, než byly dříve testované kvádry o rozměrech $40\times 40\times 160 \text{ mm}$, proběhlo na deskách o rozměrech $400\times 300\times \text{cca } 38 \text{ mm}$. V praktických průmyslových aplikacích dochází velmi často k opakovanému teplotnímu namáhání, mnohdy provázenému odlišným časovým průběhem, případně střídáním různých teplotních úrovní. V nejjednodušším případě se jedná o cyklickou změnu mezi provozní a běžnou teplotní úrovní. K popsanému typu teplotního zatěžování může docházet během pravidelných technologických přestávek, plánovaných odstávek nebo v případě nouzového vypnutí z důvodu nehody atp. Důvod vytvoření deskových vzorků spočíval především v ověření chování navrženého kompozitu s příměsí cihelného prachu v důsledku cyklického teplotního zatěžování na vzorcích s převládajícím plošným rozměrem. Převažující plošný rozměr desek může odhalit případné negativní projevy opakovaného teplotního zatěžování. V rámci výzkumu byly testovány desky referenční a vypálené při 600 °C či 1000 °C (od každé teplotní úrovně vzorky s jedním teplotním cyklem a dále vzorky s šesti teplotními cykly). Níže popsané výsledky a postupy byly autorem disertační práce publikovány v časopise *Acta Polytechnica (Cyclic Temperature Loading: Residual Flexural Strength of Refractory Slabs 2017)*.

4.9.1 Teplotní zatěžování

Dosavadní teplotní zatěžování popsané v předchozích kapitolách probíhalo vždy v jednom cyklu. V souladu se záměrem zkoušení žáruvzdorných desek došlo k modifikaci zatěžovacího schématu. Obdobně jako u menších vzorků proběhlo vysušení desek po dobu 72 hodin při teplotě 105 °C (ve stáří 28 dnů). Jeden teplotní cyklus svými parametry přesně odpovídal teplotnímu zatížení popsanému v kapitole 3.2. V případě cyklického teplotního zatěžování došlo na konci každého cyklu k vyjmutí desek z pece, jejich zvážení a následnému opětovnému uložení do elektrické pece a zopakování teplotního zatěžovacího cyklu. Po skončení šestého zatěžovacího cyklu proběhlo destruktivní zkoušení předmětných desek pomocí třibodové ohybové zkoušky (viz dále). Znázornění jednotlivých teplotních zatěžovacích schémat znázorňuje **Obrázek 79**.

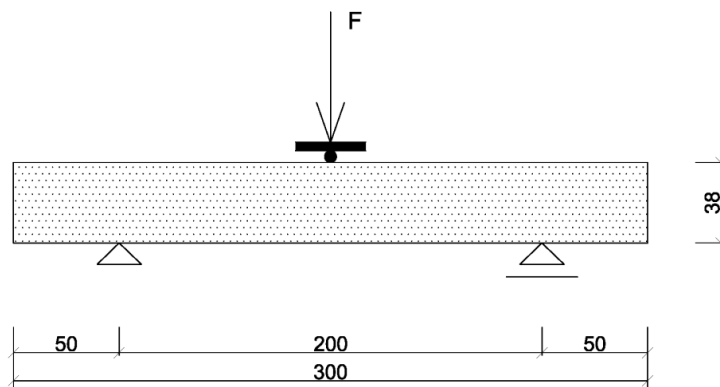


Obrázek 79 Schéma cyklického teplotního zatěžování (naznačeny 3 zatěžovací teplotní cykly).

4.9.2 Ohybová zkouška

Vzhledem k tvaru použitých desek byl účinek cyklického teplotního zatížení analyzován na základě ohybové zkoušky, a to dle dosažené pevnosti v tahu za ohybu. Uspořádání zkoušky odpovídalo tříbodovému ohybu s osovou vzdáleností podpor 200 mm a přesahem volných konců 50 mm z každé strany, jak ilustruje **Obrázek 80**. Řízení zkoušky probíhalo na základě konstantního přírůstku deformace rychlostí 0,2 mm/min, které zajišťoval zatěžovací hydraulický systém INOVA. Průběh síly zaznamenával siloměr PS20 maximálního rozsahu 20 kN, zatímco kontinuální průběh deformace zaznamenával externí indukční snímač dráhy DTA10. Data ze snímačů síly a dráhy kontinuálně zaznamenávala měřicí ústředna Dewetron DEWE-30-16. Průběh zkoušky je vyobrazen na **Obrázku 81**.

Vzhledem k relativně malé tloušťce zkoušené desky byl snímač dráhy umístěn nikoliv pod střed působící síly, nýbrž na ocelovou desku u podpor zatěžovacího přístroje. S přihlédnutím k velikosti dosahovaných sil lze toto řešení přijmout jako vypovídající o průběhu deformace.

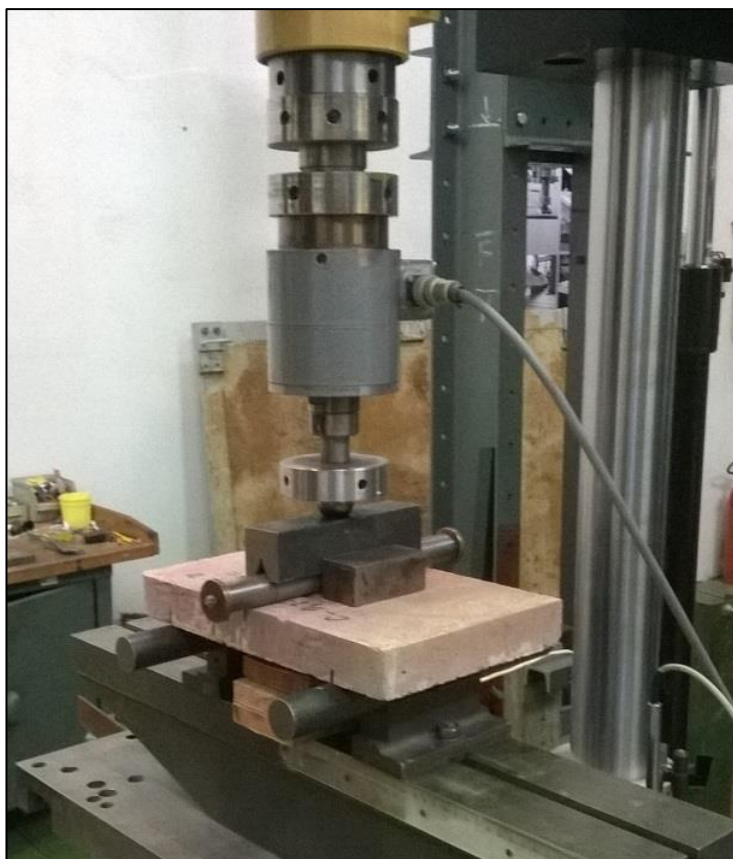


Obrázek 80 Schéma uspořádání ohybové zkoušky žáruvzdorných desek.

Výpočet maximální pevnosti v tahu za ohybu vycházející z výsledků ohybové zkoušky odpovídal teorii pružnosti dle následujícího vztahu:

$$f_{t,d} = \frac{3 \cdot F_{\max,d} \cdot l}{2 \cdot h^2 \cdot b} \quad (15)$$

- $f_{t,d}$... pevnost v tahu za ohybu deskových vzorků [MPa]
- $F_{\max,d}$... maximální síla při porušení desky ohybem [N]
- l ... rozpětí mezi podporami [mm]
- h ... výška průřezu desky [mm]
- b ... šířka průřezu desky [mm]



Obrázek 81 Uspořádání ohybové zkoušky žáruvzdorných desek.

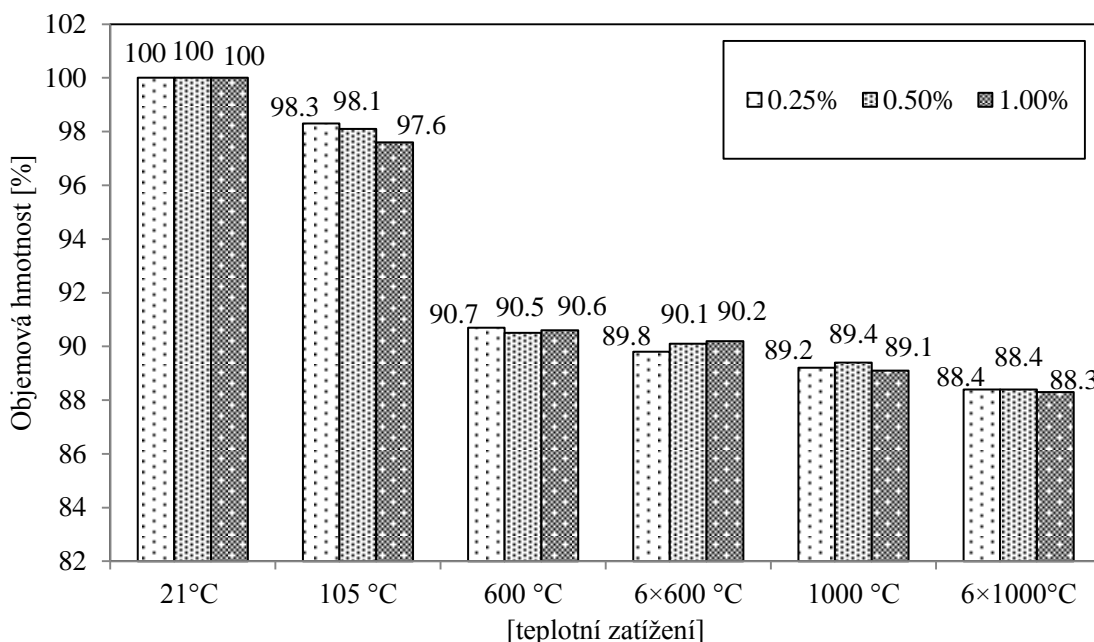
4.9.3 Dílčí výsledky

4.9.3.1 Objemová hmotnost

Je nutné zmínit, že rozměry desek byly měřeny před provedením procesu vysoušení a rovněž před samotným teplotním zatěžováním. Ke zmíněnému zjednodušení bylo přistoupeno na základě předchozích zkušeností, kdy nebyly zaznamenány rozměrové změny způsobené účinkem vysokých teplot, které lze zaznamenat běžně používanými délkovými měřidly. Vážení naopak probíhalo po vysoušení a rovněž na konci každého teplotního zatěžovacího cyklu. Vysoušení při 105 °C po dobu 72 hodin znamená průměrný pokles objemové hmotnosti o 2 %, který způsobuje ztráta převážně volné vody. Účinek prvního teplotního zatěžovacího cyklu v úrovni 600 °C lze vyjádřit průměrným poklesem objemové hmotnosti o 9,4 %. Z procentuálního vyjádření vyplývá, že se jedná o největší pokles objemové hmotnosti v důsledku teplotního zatěžování. Příčinu popsaného poklesu je třeba hledat ve ztrátě zbývající fyzikálně vázané vody a rovněž části chemicky vázané vody. Opakované teplotní zatěžování v úrovni 600 °C (celkem provedeno šest cyklů) způsobí pouze marginální změny objemové hmotnosti.

Účinek zatěžovacího cyklu v úrovni 1000 °C způsobí přibližně 1,4% pokles objemové hmotnosti v porovnání s 600 °C. Celková změna objemové hmotnosti v porovnání s laboratorními podmínkami činí v průměru 11 %. Rozdíl v hodnotách objemové hmotnosti mezi deskami podrobenými jednomu a šesti teplotním zatěžovacím cyklům s maximální teplotou 1000 °C činí necelé 1 %. Vypočtené hodnoty z naměřených hmotností a rozměrů jsou uvedeny v **Tabulce 17** spolu s procentuálním vyjádřením poklesu objemové hmotnosti

v důsledku teplotního zatěžování. Grafické zpracování popsanych výsledků a trend poklesu ilustruje graf na **Obrázku 82**.



Obrázek 82 Vliv odlišných teplot a množství čedičových vláken na hodnoty objemové hmotnosti.

Tabulka 17 Závislost objemové hmotnosti na teplotních zatěžováních.

Směs	Teplotní zatěžování					
	21°C	105°C	600°C	6×600°C	1000°C	6×1000°C
	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]					
C_0,25_C5	2410	2370	2185	2165	2150	2130
	100%	98,3%	90,7%	89,8%	89,2%	88,4%
C_0,5_C5	2325	2280	2105	2095	2080	2055
	100%	98,1%	90,5%	90,1%	89,4%	88,4%
C_1,0_C5	2295	2240	2080	2070	2045	2025
	100%	97,6%	90,6%	90,2%	89,1%	88,3%

4.9.3.2 Pevnost v tahu za ohybu

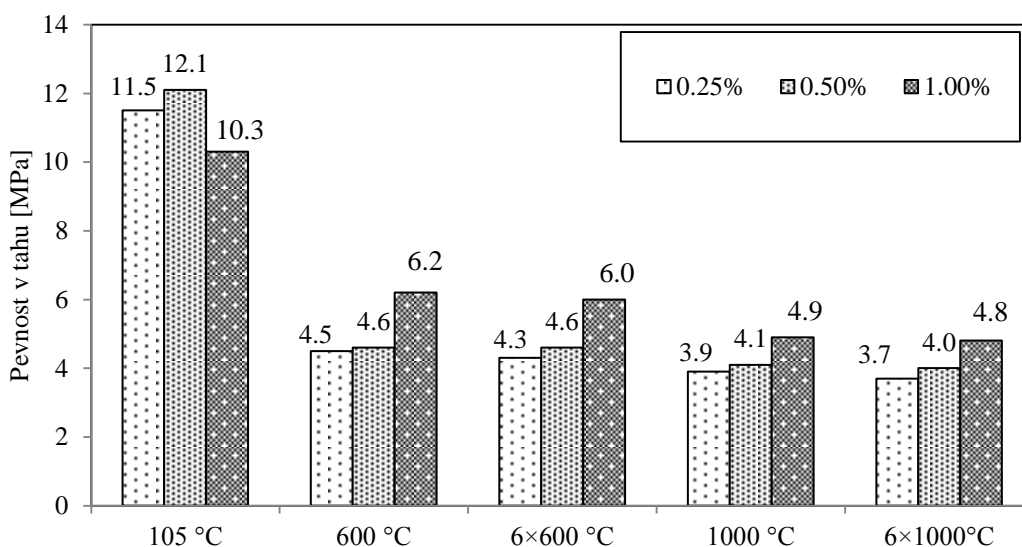
Hodnoty pevností v tahu za ohybu vypočtené dle teorie pružnosti na základě maximální dosažené síly při porušení a jí odpovídající deformace shrnuje **Tabulka 18**. Uvedené pevnosti reprezentují aritmetický průměr ze tří zkoušených vzorků. Desky vysušené při 105 °C byly zkoušeny jako referenční a k jejich pevnostem se bude vztahovat následující procentuální vyjádření. V případě tahové pevnosti se výrazně projevil účinek čedičových vláken a rovněž vliv celkového množství vláken ve složení žáruvzdorného kompozitu. Teplotní zatížení ve formě jednoho cyklu s maximální teplotou 600 °C způsobilo pokles pevnosti v tahu za ohybu na úroveň 39,1 % v případě 0,25 % čedičových vláken, na úroveň 38,0 % v případě 0,5 % čedičových vláken a na úroveň 60,2 % v případě 1,0 % čedičových vláken. Výše uvedené procentuální poklesy jsou vztaženy ke srovnávacím vzorkům vysušeným při 105 °C.

Z dosažených hodnot vyplývá pozitivní vliv většího množství vláken o objemu 1,0 %, kdy tyto vzorky zaznamenaly nejnižší pokles. Reziduální pevnosti desek s 0,25 % a s 0,5 % vláken jsou na nižší úrovni, než v případě desek s 1,0 % čedičových vláken. Účinek cyklického teplotního zatěžování ve schématu $6 \times 600^\circ\text{C}$ znamená další pokles pevnosti v tahu za ohybu o 1,2 % ve srovnání s teplotním zatěžováním pouze v jednom cyklu 600°C . Lze konstatovat, že nezávisle na množství vláken v použité směsi nastává největší pokles pevnosti v tahu za ohybu po účinku 600°C . Popsaný fenomén koresponduje s poznatky dostupnými z literatury, kdy pokles mechanických vlastností nastává po překonání teploty 400°C [181]. Účinek šesti zatěžovacích teplotních cyklů s maximální teplotou 1000°C znamená pokles na úroveň 33,9 % oproti referenčním hodnotám u desek s 0,25 % a 0,50 % čedičových vláken, zatímco pro desky s 1,0 % čedičových vláken způsobí cyklické teplotní zatěžování v úrovni 1000°C pokles na úroveň 32,5 % oproti referenčním hodnotám.

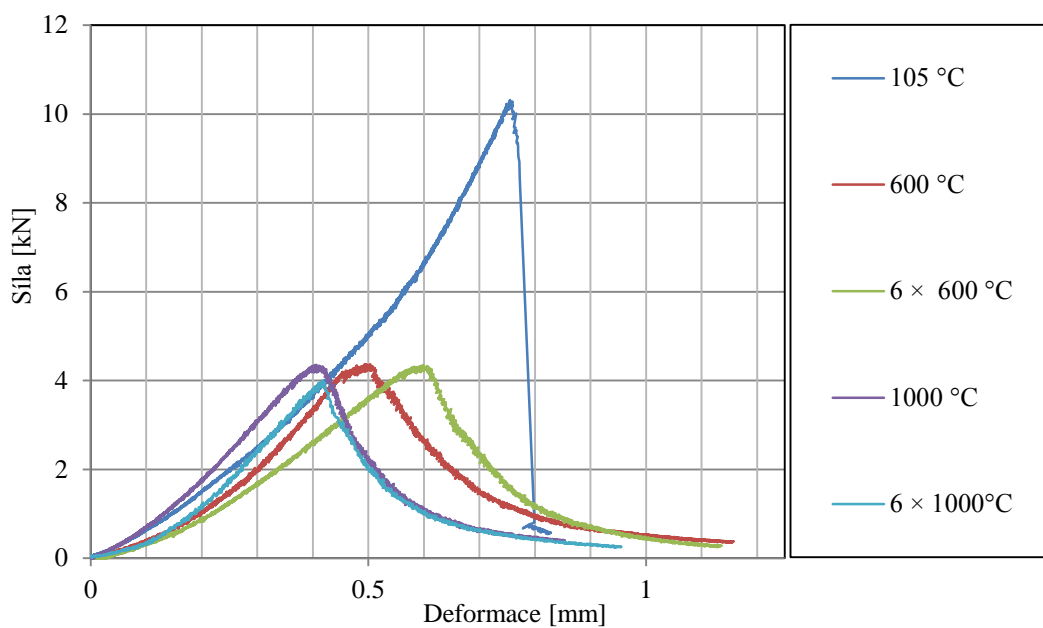
Pozitivní efekt vyšší dávky čedičových vláken v objemu 1,0 % se projevil především v reziduálních pevnostních charakteristikách po účinku nejvyššího teplotního zatížení v úrovni 1000°C . Zbytková pevnost v tahu za ohybu desek po jednom teplotním zatěžovacím cyklu činí průměrných 47,6 % ve srovnání s referenční úrovní desek vysušených při 105°C . Cyklické teplotní zatěžování v intenzitě 1000°C znamená další pokles pevnosti v tahu za ohybu o 1 % ve srovnání se zatěžováním necyklickým.

Tabulka 18 Vypočtená pevnost v tahu za ohybu a příslušná maximální deformace.

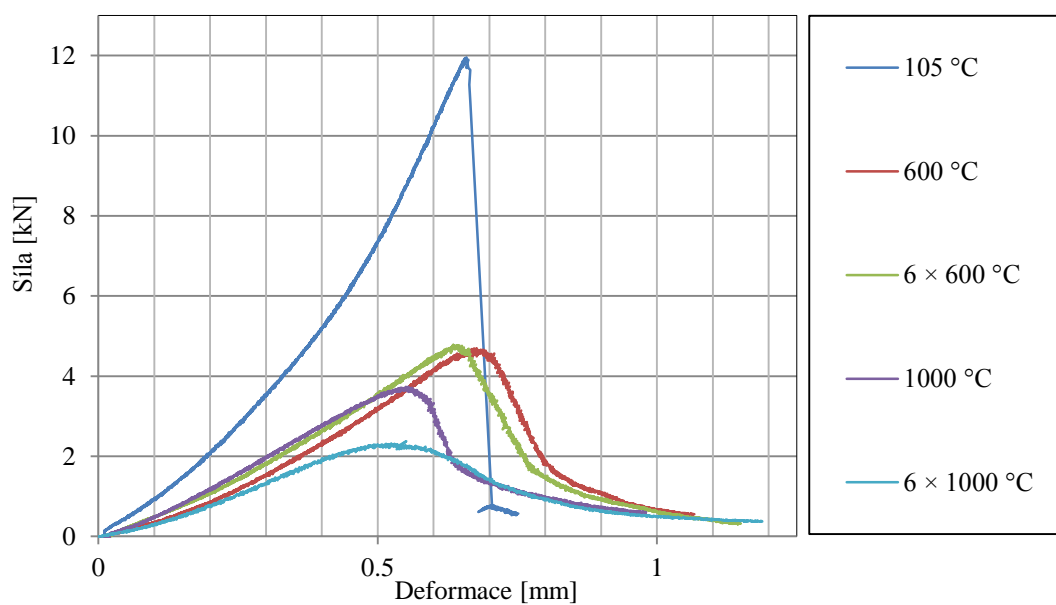
Směs	Veličina	Teplotní zatěžování				
		105°C	600°C	$6 \times 600^\circ\text{C}$	1000°C	$6 \times 1000^\circ\text{C}$
C_0,25_C5	$f_{t,d}$ [MPa]	11,5	4,5	4,3	3,9	3,7
	deformace [mm]	0,72	0,53	0,69	0,38	0,54
C_0,5_C5	$f_{t,d}$ [MPa]	12,1	4,6	4,6	4,1	4,0
	deformace [mm]	0,76	0,66	0,73	0,51	0,58
C_1,0_C5	$f_{t,d}$ [MPa]	10,3	6,2	6,0	4,9	4,8
	deformace [mm]	0,82	0,75	0,78	0,74	0,62



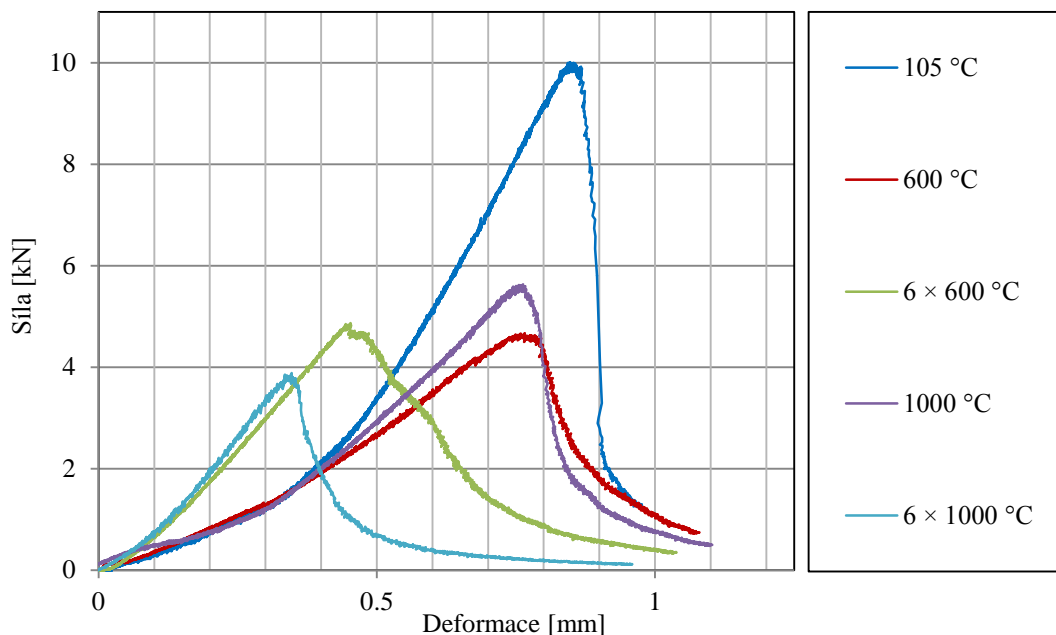
Obrázek 83 Vyhodnocení pevností v tahu za ohybu.



Obrázek 84 Záznam z ohybové zkoušky desek s obsahem 0,25 % čedičových vláken.



Obrázek 85 Záznam z ohybové zkoušky desek s obsahem 0,5 % čedičových vláken.



Obrázek 86 Záznam z ohybové zkoušky desek s obsahem 1,0 % čedičových vláken.

4.9.3.3 Duktilita

Vzhledem k uspořádání ohybové zkoušky bylo možné z datového záznamu vytvořit zatěžovací diagramy popisující průběh samotné zkoušky včetně sestupné větve po dosažení maximální síly při porušení desky. **Obrázky 84 až 86** ilustrují pracovní diagramy desek s daným objemovým množstvím čedičových vláken. V každém obrázku je uveden průběh vybrané ohybové zkoušky jedné desky od každého typu provedeného teplotního zatížení (105 °C, 600 °C, 6 × 600 °C, 1000 °C a 6 × 1000 °C). Referenční desky vykazovaly nezávisle na množství použitých vláken křehké porušení po dosažení maximální síly při ohybové zkoušce. V popsaném případě se neprojevil účinek vláken ve formě duktilního chování. Nezávisle na množství vláken a intenzitě teplotního zatěžování lze duktilní chování pozorovat u desek vystavených teplotnímu zatížení.

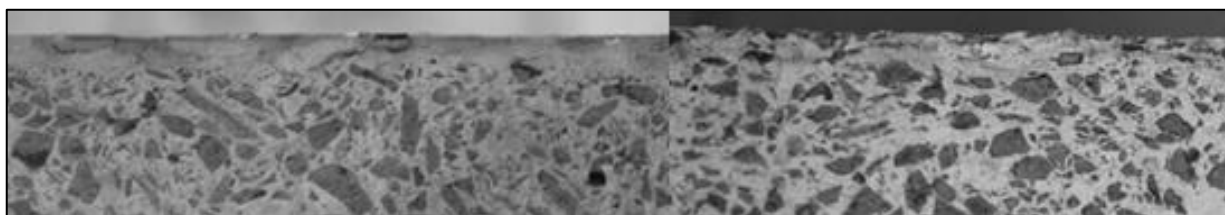
4.9.3.4 Makroskopické změny

Z makroskopického hlediska se účinek vysokých teplot projevil rovněž v barevných změnách použitého kompozitu rozpoznatelných lidským okem. Vzhledem k větším rozměrům použitých desek je tento jev markantnější než u vzorků 40×40×160 mm popisovaných v předchozích kapitolách. Samotné zbarvení žáruvzdorného kompozitu je dáno obsahem cihelného prachu a přirozeným odstínem vypáleného cihlářského střepu. Po výpalu při teplotě 600 °C dojde ke změně odstínu barevně stále odpovídající cihlářského střepu. Barevné rozdíly jsou uvedeny na **Obrázku 87** (zleva: 105 °C, 600 °C a 1000 °C). Teplotní zatížení v úrovni 1000 °C a chemické změny s ním spojené mají za následek nejzřetelnější barevnou změnu. Výsledná barva desky je výrazně světlejší, zvláště ve srovnání s referenčními vzorky.

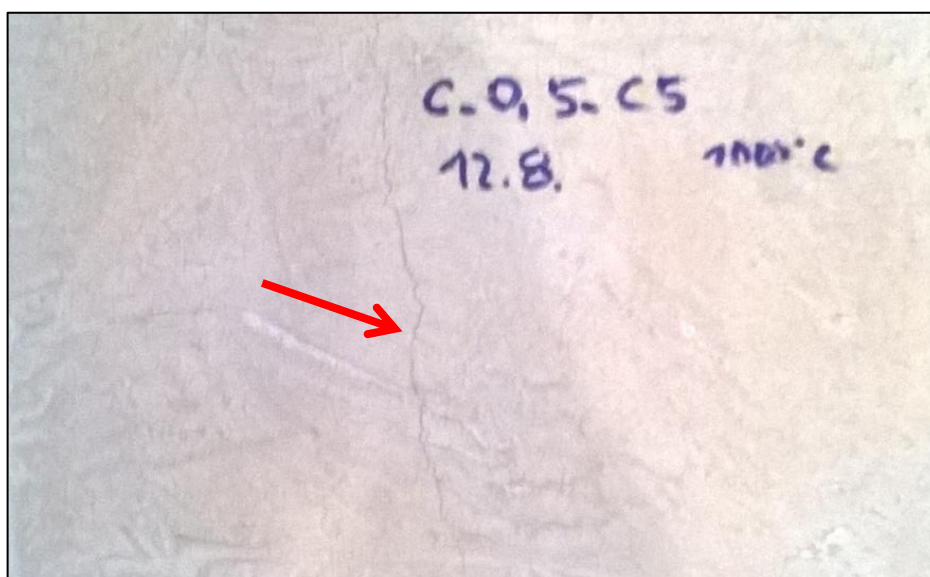


Obrázek 87 Barevné změny vlivem účinku vysokých teplot (105 °C, 600 °C a 1000 °C).

Pomocí vizuálního hodnocení je možné rovněž popsat hutnost vnitřní struktury použitého kompozitu. Z příčného řezu provedeného na deskách bylo možné posoudit homogenitu a rovnoměrnost rozmístění zrn kameniva a případnou segregaci jemných podílů. O hutnosti a homogenitě výsledného ztvrdlého kompozitu rozhodují především technologické aspekty (křivka zrnitosti kameniva a jemných podílů, vodní součinitel, použité přísady, technika míchání, ukládání a hutnění atp.). Známým jevem je rovněž tzv. stěnový efekt, kdy při kontaktu čerstvé kompozitové směsi a stěny bednění či formy dochází ke kumulování jemných podílů, zatímco větší zrna kameniva se nevyskytují přímo u stěny. Povrchová vrstva má u klasických konstrukčních betonů tloušťku 20 až 50 mm. U jemnozrnných kompozitů dosahuje tato vrstva menší mocnosti z důvodu použití kameniva řádově menších frakcí než v případě běžných konstrukčních betonů. Na následujícím **Obrázku 88** je zobrazen řez deskou s 0,25 % čedičových vláken (C_0,25_C5 – vlevo) a deskou s 1,0 % čedičových vláken (C_1,0_C5 – vpravo). Na řezu deskou s nižším obsahem vláken jsou znatelné stopy částečné segregace jemných podílů na volné ploše, která nebyla v kontaktu se stěnou formy. V případě desky s vyšším obsahem čedičových vláken již tento jev není znatelný.



Obrázek 88 Segregace jemných podílů u směsi C_0,25_C5 (vlevo), zatímco směs C_1,0_C5 (vpravo) je homogenní.



Obrázek 89 Trhliny na povrchu desky s 0,50 % čedičových vláken po cyklickém zatěžování v úrovni 1000 °C.

4.9.4 Dílčí závěry a diskuze

Celkem bylo vyzkoušeno 45 desek vyrobených ze studovaného cementového kompozitu s odlišným množstvím čedičových vláken. Účinek vysokých teplot byl analyzován běžným a cyklickým teplotním zatížením ve dvou úrovních (600 °C a 1000 °C). Desky vysušené při 105 °C sloužily jako srovnávací vzorky.

Na základě provedeného experimentálního programu můžeme shrnout několik závěrů. Největší pokles objemové hmotnosti nastává po procesu vysušení při 105 °C. Další pokles nastává vlivem rostoucího teplotního zatížení. Z dosažených výsledků vyplývá, že cyklické teplotní zatížení nemá výrazný vliv na další pokles objemové hmotnosti.

Z průběhu provedených ohybových zkoušek a z následně vyhodnocených datových záznamů lze vyvodit, že hodnota maximálního dosaženého průhybu ve středu rozpětí je parametrem závislým na množství vláken. Provedené vyhodnocení naopak nepotvrdilo vliv cyklického teplotního zatěžování na hodnotu maximální deformace. Účinek vysokých teplot se projevil ve změně typu porušení a rovněž samotného průběhu ohybové zkoušky. Referenční desky, které nebyly podrobeny teplotnímu zatěžování, vykazovaly křehké porušení v okamžiku dosažení maximální působící síly (odpovídající maximální pevnosti v tahu za ohybu). Sestupná větev pracovního diagramu je identifikovatelná u všech desek zatížených vysokými teplotami různé intenzity.

Z makroskopického hlediska nezpůsobilo cyklické teplotní zatížení v nižší úrovni (6×600 °C) žádné pozorovatelné změny (vyjma barevných), povrchové trhliny v pojivu či v plnivu. Rovněž teplotní zatížení v úrovni 1000 °C se makroskopicky nijak neprojevilo kromě barevných změn. V případě cyklického teplotního zatěžování v úrovni 1000 °C se v rozmezí třetího a čtvrtého teplotního cyklu objevily povrchové vlasové trhliny (viz **Obrázek 89**) na deskách s 0,25 % a 0,5 % čedičových vláken. Popsané trhliny nepronikly skrz celý průřez desky. Použitím maximální zkoumané dávky vláken ve výši 1,0 % se tento negativní jev eliminuje. Popsaný úkaz zároveň reflektuje limity použitého přírodního čedičového kameniva.

Jako dílčí závěr lze uvést, že testovaný cementový kompozit ve variantě s 1,0 % čedičových vláken představuje vhodný materiál pro aplikaci v podmínkách vysokých teplot.

KAPITOLA 5

ZÁVĚR

Předložená disertační práce tematicky navazuje na výzkum cementových kompozitních materiálů vyztužených vlákny, který má na pracovišti Experimentálního centra, Fakulty stavební ČVUT v Praze dlouholetou tradici. Pro řešení problematiky dané tématem disertační práce bylo využito dosavadních poznatků s cílem modifikovat složení žáruvzdorného cementového kompozitu pomocí různého množství jemnozrnných pucolánově aktivních materiálů. Další motivací, v souladu s názvem a tématem této práce, bylo využití různých typů vláken pro zlepšení především reziduálních mechanických parametrů sledovaných kompozitů po účinku teplotního zatížení. Prezentované výsledky byly zjištěny vyzkoušením celkem cca 2000 vzorků 40×40×160 mm. Z provedené literární rešerše vyplývá, že problematika kompozitů na bázi hlinitanového cementu, jakož i vlákny vyztužených kompozitů a jejich interakce s prostředím vysokých teplot je velice aktuální téma, kterému je celosvětově věnována pozornost. Rovněž problematice hydrotermálního ošetřování je věnována rozsáhlá pozornost mnoha výzkumných týmů.

Následující závěry shrnují nejzásadnější poznatky zjištěné v průběhu řešení disertační práce, které jsou formulovány na základě dílčích závěrů z jednotlivých částí provedeného experimentálního programu.

- V úvodu experimentální části byl zpracován experiment zaměřený na studium vlastností past z hlinitanového cementu s odlišným vodním součinitelem. Byl prokázán vliv vodního součinitele nejen na reologické vlastnosti, ale také na mechanické charakteristiky před i po účinku teplotního zatížení. Při použití nejnížší možné hodnoty vodního součinitele 0,25 (limitováno zpracovatelností) bylo na referenčních vzorcích dosaženo pevnosti v tlaku 107,5 MPa a pevnosti v tahu za ohybu 8,1 MPa. Teplotní zatížení v úrovni 600 °C má vliv na pokles především tahových charakteristik, kdy pevnost v tahu za ohybu klesla na třetinovou hodnotu oproti pevnosti v tlaku, která se snížila pouze o cca 13 %. Účinek 1000 °C se projevil fatálním poklesem pevnosti v tahu za ohybu o 93 %. Uvedené hodnoty potvrzují předpoklad rozpadu hydraulické vazby a vhodnost použití vláken pro dosažení příznivějších mechanických parametrů pro kompozity vystavené vysokým teplotám.
- Na úvodní studii o hlinitanovém cementu navázal experimentální program s plnohodnotným cementovým kompozitem obsahujícím přírodní čedičové kamenivo, který byl rozšířen z hlediska možnosti využití jemnozrnných substituentů

hlinitanového cementu v rozdílném množství. Celkem bylo použito 108 směsí vzájemně se lišících typem a množstvím vláken (čedičová v množství 0,25 %, 0,5 %, 1,0 %, 2,0 %, 4,0 % a keramická v množství 0,25 %, 4,0 % a 8,0 %) a odlišným zastoupením cihelného prachu či metakaolinu jakožto substituentu hlinitanového cementu. U těchto směsí byla provedena analýza objemových hmotností a mechanických vlastností (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a lomová energie) v režimu vysušení a dále ve dvou úrovních teplotního zatížení – 600 °C a 1000 °C. Parametry odlišující jednotlivé směsi určovaly široké rozpětí výsledných parametrů včetně zpracovatelnosti a chování čerstvé směsi. Postupná substituce hlinitanového cementu jemnozrnným plnivem s pucolánovými vlastnostmi vede k poklesu zpracovatelnosti za současného zlepšení chování čerstvé směsi po jejím uložení ve vztahu k homogenitě. Z vypočtených mechanických parametrů lze identifikovat vliv čedičových vláken na pevnost v tlaku, kdy od množství odpovídajícího dvěma objemovým procentům dochází k jejímu poklesu za současného nárůstu pevnosti v tahu za ohybu. Uvážíme-li dosažené mechanické parametry po účinku teplotního zatížení a reologické vlastnosti čerstvé směsi, jeví se jako nejvhodnější množství 0,5 % až 1,0 % čedičových vláken či 4 % vláken keramických. Při substituci hlinitanového cementu v množství 25 % (vztaženo k hmotnosti) cihelným prachem dojde ke snížení energetické a ekonomické náročnosti studovaného kompozitu za současného zachování dostatečných parametrů a soudržnosti po výpalu při 600 °C a 1000 °C.

- Na základě evaluace dosažených mechanických parametrů a reologických vlastností před i po zatížení vysokými teplotami bylo identifikováno optimální složení cementového kompozitu z hlediska typu a množství vláken a rovněž vzájemného poměru hlinitanového cementu a jemnozrnných příměsí. Proběhla analýza mechanických parametrů v režimu detailnějšího teplotního zatížení. Ze získaných výsledků vyplývá rychlý pokles sledovaných parametrů v teplotním intervalu cca 300 °C až 500 °C. Pevnost v tahu za ohybu je ve srovnání s pevností v tlaku senzitivnější na teplotní zatížení. Její pokles nastává dříve a je výraznější. Strukturní a rozměrová stabilita čedičových vláken i po účinku 1000 °C byla prokázána komparací snímků z elektronového mikroskopu zobrazujících vlákna před a po teplotním zatížení.
- Dílčí experiment zaměřený na použití nežáruvzdorných komponent (křemičité kamenivo a portlandský cement) potvrdil kompletní rozklad pojivového systému vlivem teplotního zatížení v úrovni 1000 °C. Změny křemičitého kameniva spojené s transformací jednotlivých forem křemene byly prokázány na základě snímků z elektronového mikroskopu.
- Experimentální kvantifikace účinku hydrotermálních podmínek ošetřování na residuální mechanické vlastnosti byla sledována na kompozitu obsahujícím čedičová vlákna a 225 kg·m⁻³ cihelného prachu. Na tomto kompozitu byl sledován vliv optimálního času počátku působení hydrotermálních podmínek ošetřování ve vztahu k dosaženým mechanickým parametrům, především pak reziduálních pevností po teplotním zatížení. Největší účinnost hydrotermálních podmínek se projevila na kompozitu, jehož ošetřování započalo ve 36 hodinách stáří. Benefit autoklávování spočívá především v nárůstu pevnosti v tahu za ohybu. Při použití směsi bez cihelného prachu byla zjištěna pevnost v tahu za ohybu u vzorků vypálených při 1000 °C 5,7 MPa, zatímco tlaková pevnost byla 45,9 MPa. Dalším projevem hydrotermálního ošetřování je dosažení vyšších hodnot objemové hmotnosti, což souvisí se vznikem hutnější mikrostruktury. Vliv vzájemného poměru hlinitanového cementu a cihelného prachu byl sledován na zkušební souboru vzorků obsahujících keramická vlákna.

Z vyhodnocených mechanických parametrů vyplývá, že s rostoucím množstvím cihelného prachu klesá především tlaková pevnost. Pozitivní efekt hydrotermálního ošetřování se projevil v případě pevnosti v tahu za ohybu vzorků vystavených působení vysokých teplot.

- Ověření možnosti aplikace vyšetřovaného kompozitu v prostředí simulující reálné podmínky (opakované teplotní zatížení) proběhlo na vzorcích tvaru desek o rozměru 400×300×38 mm. Objemovou hmotnost determinuje první expozice účinku vysokých teplot, následná opakovaná teplotní zatížení mají vliv pouze v řádu desetin procenta. Dosažená pevnost v tahu za ohybu korespondovala s pevností dosaženou na laboratorních vzorcích 40×40×160 mm. Rozdíl v pevnosti v tahu za ohybu u desek zatížených opakovaným výpalem a desek podrobených pouze jednomu výpalu se lišil maximálně o 0,2 MPa nezávisle na intenzitě teplotního zatížení (600 °C či 1000 °C). Hodnota pevnosti v tahu za ohybu u desek podrobených cyklickému teplotnímu zatížení dosahovala mírně nižších, případně stejných hodnot jako v případě desek vystavených pouze jednomu cyklu teplotního zatížení. Očekávaný limit přírodního kameniva, spolu s poklesem pevnosti hydraulické vazby, se projevil v případě opakovaného vystavení prostředí s teplotou 1000 °C. Na deskách zhotovených ze směsi obsahující 0,25 % či 0,5 % čedičových vláken se objevily vlasové trhliny, které však nezasahovaly do celého průřezu desky. Dávka čedičových vláken odpovídající 1,0 % (vztaženo k objemovému množství) dokázala zamezit vniku trhlin i v případě opakovaného teplotního zatížení v úrovni 1000 °C. Z uvedených závěrů vyplývá, že pro opakované teplotní zatížení (tedy střídání teplot v úrovni 600 °C a laboratorní teploty) je vhodné použít 1,00 % čedičových vláken pro zajištění integrity a celkové odolnosti testovaného kompozitu. Pevnost v tahu za ohybu desek z takto vyztuženého kompozitu dosahovala 4,8 MPa.
- Dílčí analýzy byly zaměřeny na studium pórové struktury cementového kompozitu s odlišnou substitucí hlinitanového cementu cihelným prachem. Povrch, geometrie a struktura čedičových vláken byla studována ve třech teplotních úrovních (105 °C, 600 °C a 1000 °C) pomocí elektronové mikroskopie.

Výše popsány závěry došlo k naplnění cílů disertační práce v souladu s jejich přehledem uvedeným v rámci úvodní kapitoly *1.3 Cíle disertační práce*. Na základě dílčích závěrů uvedených v jednotlivých kapitolách a celkového shrnutí lze konstatovat, že kompozit s čedičovým kamenivem s relativně vysokou substitucí hlinitanového cementu cihelným prachem disponuje i po teplotním zatížení v úrovni 1000 °C dostatečnými residuálními mechanickými vlastnostmi. Dosažené pevnostní parametry jsou však podmíněny aplikací vláken, kdy čedič se jeví jako vhodný materiál. Použití cihelného prachu přináší benefity z hlediska dosažených parametrů a rovněž z pohledu environmentálního. Jedná se o odpadní materiál, který je dále plnohodnotně využit, a navíc funguje jako substituent energeticky a finančně náročného hlinitanového cementu, což je v souladu s moderními trendy trvale udržitelného rozvoje aplikovanými nejen ve stavebnictví.

KAPITOLA 6

MOŽNOSTI DALŠÍHO SMĚŘOVÁNÍ

Závěry uvedenými v předchozí kapitole došlo ke splnění cílů disertační práce, jak byly uvedeny a vytyčeny v úvodní kapitole. V průběhu řešení vyvstala rovněž řada otázek s potenciální možností pro další prohlubující či navazující výzkumné směřování v oblasti cementových kompozitů s přírodním kamenivem aplikovatelných v prostředí vysokých teplot. Zajímavou oblastí, nabízející potenciál pro hlubší studium, je pojivový systém na bázi hlinitanového cementu a pucolánově aktivních materiálů (cihelňák a metakaolin) v prostředí superplastifikační přísady. Potenciál pro hlubší analýzu jistě má i vliv hydrotermálního ošetřování na výsledné hydratační produkty pojivového systému na bázi hlinitanového cementu a cihelného prachu a jejich změny následkem teplotního zatížení. Nabízí se i možnost dosažení vyšších mechanických parametrů použitím většího tlaku v autoklávu. Dále by bylo vhodné doplnit provedené experimenty o detailní analýzu vlivu vysokých teplot na složení uvedeného kompozitu, především ve vztahu k procesu dehydratace hydratačních produktů, jejich popisu a identifikaci (pro laboratorně ošetřované vzorky, případně i hydrotermálně ošetřené). Další potenciální oblast výzkumu v oblasti desek z cementového kompozitu spočívá v možnosti snížení jejich tloušťky za použití textilní výztuže zhotovené z materiálů odolných vůči účinkům vysokých teplot.

Seznam použité literatury

- [1] Badofianis, E., Kakali, G., Dimopoulou, G.: *Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins*. In: Cement and Concrete Composites 27, /2005), s. 197-203.
- [2] Stonis, R., Pundiene, I., Antonovič, V., Kligis, M., Spudilis, E.: *Study of the effect of replacing microsilica in heat-resistance concrete with additive based on metakaolin*. In: Refractories and Industrial Ceramics 2013, s. 43-48.
- [3] ASTM C71-01 Standard Terminology Relating to Refractories, dostupné z: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C71-01.htm>
- [4] Sadik, Ch., Amrani, L. E., Albizane, A.: *Recent advances in silica-alumina refractory: A review*. In: Journal of Asian Ceramic Society 2 (2006) s. 83-96.
- [5] Routscha, G., Wuthnow H. (Editors): *Pocket Manual Refractory Materials Design Properties Testing, 3rd Edition*, ISBN-10: 3802731581 (2008), s. 646.
- [6] Jadeha, K. H., Saradava, K.: *Property analysis of alumina refractory bricks – a review*. In: International Journal of Futuristic Trends in Engineering and Technology 1, (2014), s. 1 – 3.
- [7] DIN EN 1402-1 Unshaped refractory products – Part 1: Introduction and classification, (2003).
- [8] ČSN EN ISO 1927-1 Žáruvzdorné výrobky, všeobecně (2013).
- [9] dostupné z: <https://www.ceramicindustry.com/articles/93166-refractories-101>
- [10] Santos, T., Santos, J., Luz, A. P., Pagliosa, C., Pandolfelli, V. C.: *Kinetic control of MgO hydration in refractory castables by using carboxylic acids*. In: Journal of the European Ceramic Society 38, (2018), s. 2152-2163.
- [11] Wang, X., Zhao, P., Chen, J., Zhao, H. He, K.: *Corrosion resistance of Al-Cr-slag containing chromium-corundum refractories to slag with different basicity*. In: Ceramics International 44, (2018), s. 12162-12168.
- [12] dostupné z http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/How_to_Classify_Refractory_Materials.pdf
- [13] Holčápek, O.: *Binder for Refractory Cement Composite – Hydration, Changing Due to High Temperatures and Fracture Energy*. In: Materials Science Forum 824, (2015), s. 185-190.
- [14] Navrotsky A.: *Thermochemical insights into refractory ceramic materials based on oxides with large tetravalent cations*. In: Journal of Materials Chemistry 15 (2005), s. 1883-1890.
- [15] Ebbrecht, T., Weyershausen, B., Lipinski, T. R., Strohm, H.: *A novel high performance binder for refractories*. In: Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories UNITECR 2007, (2007), s. 388-390.
- [16] Zhu, B., Zhu, Y., Li, X., Zhao, F.: *Effect of ceramic bonding phases on the thermos-mechanical properties of Al₂O₃-C refractories*. In: Ceramics International 39 (2013), s. 6069-6076.
- [17] Rodríguez, E. A., Castillo, G. A., Das, T. K., Puerte-Ornelas, R., Gonzáles, Y., Arato, A. M., Aguilar-Marínez, J. A.: *MaAl₂O₄ spinel as an effective ceramic bonding in a MgO-CaZrO₃ refractory*. In: Journal of the European Ceramic Society 33, (2013), s. 2767-2774.
- [18] *Refractory Engineering: Materials – Design – Construction, 2nd revised and updated edition*, Vulkan-Verlag, ISBN-10: 3802731557, (2005), s. 486.
- [19] Sarkar, R.: *Refractory Technology – Fundamentals and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN 9781498754255, (2016).
- [20] Caniglia, S., Barma, G. L.: *Handbook of Industrial Refractories Technology, Principles, Types, Properties and Applications*, William Andrew publisher, ISBN-13: 978-0815513049, (1993), s. 650.
- [21] Stancu, C., Angelescu, N., Bratu, V.: *The hydration of super aluminous cement and the mechanical strength development*. In: The Scientific Bulletin of VALAHIA University – MATERIALS and MECHANICS 7, (2012), s. 33-38.
- [22] dostupné z http://www.lafarge.com/frise/03272013-group-lafarge_timeline-uk.html
- [23] dostupné z <http://www.ladce.sk/online-kronika-1989-2013>
- [24] dostupné z <http://www.pcla.sk/sk/stranka/historia>
- [25] Lourenco, R. R., Angelica, R. S., Rodrigues, J. A.: *Preparation of Refractory Calcium Aluminate Cement using the Sonochemical Process*. In: Materials Research 2012, s. 1-9.
- [26] Stinnesen, I., Buhr, A., Kockegy-Lorenz, R., Rachel, R.: *High Purity Calcium Aluminate Cements, Production and Properties*. dostupné z: http://the-premium-alumina-company.com/media/3985/high_purity_calcium-aluminate-cements_production_and_properties.pdf

- [27] Kurdowski, W.: *Cement and Concrete Chemistry*. Springer, ISBN 978-94-007-7944-0, (2014), s. 700.
- [28] Shaoyan, L.: *Comparing New Formulated Calcium Aluminate Cement (C12A7 Rich) with (CA Rich) in CAC-ggbs Blending System*. In: UCL Department of Civil, Environmental & Geomatic Engineering, Gower St, London, dostupné z: https://www.cege.ucl.ac.uk/teaching/MSc.../CivEng_Li_S.pdf
- [29] Škvára, F.: *Technologie anorganických pojiv II*, VŠCHT (1995).
- [30] Barnes, P, Bensted, J.: *Structure and Performance of Cements*, ISBN-13: 978-0419233305, (2002), s. 584.
- [31] Hewlett, P.: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th Edition, ISBN: 9780080535418, New York, (1971).
- [32] Calcium Aluminate Cements – History, Manufacture and Grades of Calcium Aluminate Cements, (2002), dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1634>
- [33] Macphée D. E., Lachowski, E. E.: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, ed. P. C. Hewlett, Elsevier, 4th ed., (2006), s. 111.
- [34] Klaus, S., Buhr, A., Schmidtmeier, D., Kuiper, S., Goetz-Neunhoeffler, F.: *Hydration of calcium aluminate cement phases CA and CA2 in refractory applications*. dostupné z: <http://www.almatis.com/media/1355/hydration-of-calcium-aluminate-cement-phase-ca-and-ca2-in-refractory-applications.pdf>
- [35] Schmidt, A., Chotard, T., Gimet-Breart, N., Farget, D.: *Correlation between hydration mechanism and ultrasonic measurements in a aluminous cement: effect of setting time and temperature on the early hydration*. In: *Journal of Eur. Ceramics Society* 22, (2002), s. 1947-1958.
- [36] Innocentini, M. D. M., Ribeiro, C., Bittencourt, L. R. M., Pandolfelli, V. C.: *Fluid dynamics and thermal aspects of the dewatering of high-alumina refractory castables: removal of physically absorbed water*. In: *Journal American Ceramic Society* 84, (2001), s. 2696-2698.
- [37] Cardos, F. A., Innocentini, M. D. M., Akiyoshi, M. M., Pandolfelli, V. C.: *Effect of curing time on the properties of CAC bonded refractory castables*. In: *Journal of the European Ceramic Society* 24 (2004), s. 2073-2078.
- [38] Li, J., Cai, B., Feng, W., Liu, Y., Ma, H.: *Investigation on phase constitution, mechanical properties and hydration kinetics of aluminous cements containing magnesium aluminate spinel*. In: *Ceramics International* 39, (2013), s. 8393-8400.
- [39] Midgley, H. G., Midgley A.: *The conversion of high alumina cement*. In: *Magazine of Concrete Research* 27, (1975), s. 59-77.
- [40] High Alumina Cements & Chemical Binders, Refractory Technology – an Introduction and Update, Institute of Refractories Engineering, IRE, South Africa, (1996), pp. 1- 15, dostupné z: <http://almatis.com/media/1716/high-alumina-cements-chemical-binders.pdf>
- [41] Cottin, B. Reif, P.: *Rev. Matetria Construction* 661, (1970), s. 293.
- [42] Kula, T. M., Meiser, M. D., Tressler, R. E.: *Curing temperature and humidity effect on the strength of an aluminous cement*. In: *Cement and Concrete Research* 10 (1980), s. 491-497.
- [43] Pacewska, B., Nowacka, M.: *Investigation of high aluminate cement-based binder at different ambient temperature*. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 109 (2012), s. 717-726.
- [44] Taylor, H. F. W.: *Cement Chemistry*, Academic Press, London, (1990).
- [45] Hewlett, P.: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th Edition, ISBN: 9780080535418, New York, (1971).
- [46] Palou, M. T., Bágel, L., Živica, V., Kuliffayová M., Ifka, T.: *Hydration of high alumina cement-silica fume composite with addition of Portland cement or sodium polyphosphate under hydrothermal treatment*. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 113, (2013).
- [47] Majumdar, A. J., Edmons, R. N., Singh, B.: *Hydration of Secar 71 Aluminous Cement in the Presence of Granulated Blast Furnace Slag*. In: *Cement and Concrete Research* 20 (1990), s. 7-14.
- [48] Collier, N. C.: *Transition and decomposition temperatures of cement phase – a collection of thermal analysis data*. In: *Ceramics-Silikáty* 60 (2016) 4, s. 338-343.
- [49] Robson, T. D.: *Aluminous cement in refractory castables*, H.F.W. Taylor (Ed), *The Chemistry of Cements* 2, Academic Press London, New York (1964), s. 3-35.
- [50] Vejmelková, E., Koňáková, D., Scheinherrová, L., Doleželová, M., Keppert, M., Černý, R.: *High temperature durability of fiber reinforced high alumina cement composites*. In: *Construction and Building Materials* 162, (2018), s. 881-891.

- [51] Rambo, D. A. S., Silva, F. A., Rilho, R. D. T., Gomes, O. F. M.: *Effect of elevated temperatures on the mechanical behaviour of basalt textile reinforced refractory concrete*. In: *Materials and Design* 65 (2015), s. 24-33.
- [52] George C. M.: *Structure and Performance of Cements*. In: Applied Science Publish, (1983), s. 415.
- [53] Antonovič, V., Keriene, J., Boris, R., Aleknevičius, M.: *The Effect of Temperature on the Formation on the Hydrated Calcium Aluminate Cement Structure*. In: *Procedia Engineering* 57, (2013), s. 99-106.
- [54] Maaroufi, M. A., Lecomte, A., Diliberto, C., Francy, O., Brun, P. L.: *Thermo-hydrous behavior of hardened cement paste based on calcium aluminate cement*. In: *Journal of European Ceramic Society* 35 (2015), s. 1637-1646.
- [55] Antonovič, V., Keriene, J., Boris, R., Aleknevičius, M.: *The Effect of Temperature on the Formation on the Hydrated Calcium Aluminate Cement Structure*. In: *Procedia Engineering* 57, (2013), s. 99-106.
- [56] dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/15310-srovnani-konecnych-vlastnosti-portlandskych-cementu-vlivem-druhu-mleti>
- [57] dostupné z: http://www.gorka.com.pl/gorflow_en.html
- [58] dostupné z: <http://www.secar.net/>
- [59] dostupné z: <https://www.calucem.com/products/compare-products.html>
- [60] dostupné z: <http://www.almatis.com/market-en/ceramics/cement/>
- [61] dostupné z: <https://caltra.com>
- [62] dostupné z: <https://www.rsrefractory.com>
- [63] dostupné z: <http://www.cimsa.com.tr/en/products-services/cement/calcium-aluminate-cement/cimsa-isidac-40-calcium-aluminate-cement/i-280>
- [64] dostupné z: <http://www.agcc.jp/en/product/ac/tabid/185/Default.aspx>
- [65] Wang, Z., Zhao, J., Cao, X., Yu, L., Zhang, S., Shi, G., Huang, Y., Zhu, Z.: *Study on mechanism of explosive spalling of ULC castables during rapid drying*. In: 14th Biennial Worldwide Congress, s. 1-5. Dostupné z: <http://or.nsf.gov.cn/bitstream/00001903-5/407029/1/1000013937107.pdf>
- [66] Hibbs, D. L., Brown, J. J.: *Internal pressure measurements for control of explosive spalling in refractory castables*. *American Ceramic Society Bulletin* 63, (1984), s. 905-910.
- [67] Wang, Z., Zhao, J., Cao, X., Huang, Y., Zhu, Z.: *Research methods of explosive spalling of dense refractory castables during rapid drying*. In: *Journal of Chinese Ceramic Society* 42 (2014), s. 768-772.
- [68] Collignon, B., Moyne, C., Guichard, J. L., Perrot, C., Jannot, Y.: *Modelling the pressure dependence and the influence of added polymeric fibers on the permeability of refractory concretes*. In: *Ceramics International* 37 (2011), s. 627-634.
- [69] Ribeiro, C., Innocentini, M. D. M., Pandolfelli, V. C.: *Dynamic Permeability Behavior during Drying of Refractory Castables Based on Calcium-Free Alumina Binders*. In: *Journal of American Ceramic Society* 84 (2001), s. 248-250.
- [70] Sideris, K. K., Manita, P.: *Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concrete exposed to elevated temperatures*. In: *Construction and Building Materials* 41 (2013), s. 296-302.
- [71] Dellisanti, F., Rossi, P. L., Valdré, G.: *Remediation of asbestos containing materials by Joule heating vitrification performed in a pre-pilot apparatus*, *International Journal of Mineral Processing* 91, (2009), s. 61-67.
- [72] Radvanec, M., Tuček, L., Derco, J., Čechovská, K., Németh, Z.: *Change of carcinogenic chrysolite fibers in the asbestos cement (eternity) to harmless waste by artificial carbonatization: Petrological and technological results*. In: *Journal of Hazardous Materials* 15, (2013), s. 390-400.
- [73] Svoboda, L.: *Stavební hmoty*, ISBN 978 80 8076 057 1, (2009).
- [74] Bassani, C., Cavalli, R. M., Cavalcante, F., Cuomo, V., Palombo, A., Pacucci, S., Pignatti, S.: *Deterioration status of asbestos-cement roofing sheets assessed by analysing hyperspectral data*. In: *Remote Sensing of Environment* 109, (2007), s. 361-378.
- [75] Kazan-Allen, L.: *The asbestos war*. In: *International Journal Occupational Environmental Health* 9 (2003), s. 173-193.
- [76] Morova, N.: *Investigation of usability of basalt fibres in hot mix asphalt concrete*. In: *Construction and Building Materials* 47 (2013), s. 175-180.
- [77] Berozashvili, M.: *Continuous reinforcing fibers are being offered for construction, civil engineering and other composites applications*. In: *Advanced Material Composite News, Composite Worldwide*, (2001), s. 5-6.

- [78] Fiore, V., Scalici, T., Bella, G. D., Valenza, A.: *A review on basalt fibre and its composites*. In: Composites Part B: Engineering 71, (2015), s. 74-94.
- [79] Sim, J., Park, Ch., Moon, D. Y.: *Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures*. In: Composites: Part B 36, (2005), s. 504-512.
- [80] Li, W., Xu, J.: *Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm diameter split Hopkinson pressure bar*. In: Material Science Engineering A – Structure (2009), s. 145-153.
- [81] Liu, J., Yang, J., Chen, M., Lei, L., Wu, Z.: *Effect of SiO₂, Al₂O₃ on heat resistance of basalt fiber*. In: Thermochemica Acta 660 (2018), s. 56-60.
- [82] Landucci, G., Rossi, F., Nicoletta, C., Zanelli, S.: *Design and testing of innovative materials for passive fire protection*. In: Fire Safety Journal (2009), s. 44-110.
- [83] Bunsell, A. R., Berger, M. H.: *Fine diameter ceramic fibres*. In: Journal of European Ceramic Society 20, (2000), s. 2249-2260.
- [84] Su, H., Xu, J.: *Dynamic compressive behaviour of ceramic fiber reinforced concrete under impact load*. In: Construction and Building Materials 45 (2013), s. 306-313.
- [85] Description and characterization of the ceramic fibres industry of the European Union. (1995).
- [86] Chan, H. C., Patterson, W. A.: *Effects of ageing and weathering on the tensile strength of glass fibre reinforced high-alumina cement*. In: Journal of Materials Science 6 (1971), s. 342-346.
- [87] Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. Dostupné z: <https://www.accessengineeringlibrary.com/browse/concrete-microstructure-properties-and-materials-fourth-edition>
- [88] Krüger, M., Reinhardt, H. W.: *Fire resistance*. In: Textile Reinforced Concrete (2006), s. 211-219.
- [89] Antons, U., Raupach, M., Kulas, Ch., Hegger, J.: *High-temperature tests of concrete specimens reinforced with alkali-resistant glass rovings under bending loads*. In: International Conference on FRP Composites in Civil Engineering 6, (2012), s. 1-8.
- [90] Damme, H. V., Pellenq, R. J. M., Ulm, F. J.: *Chapter 14.3 – Cement Hydrates*. In: Developments in Clay Science 5, (2013), s. 801-8017.
- [91] Kaufmann, J., Lothenbach, B., Winnefeld, F.: *Stability of ettringite in CSA cement at elevated temperatures*. In: Advances in Cement Research 28, (2015) s. 251-261.
- [92] Song, H., Joeng, Y., Bae, S., Jun, Y., Yoon, S., Oh, J. E.: *A study of thermal decomposition of phases in cementitious system using HT-XRD and TG*. In: Construction and Building Materials 169 (2018), s. 648-661.
- [93] Castellote, M., Llorente, I., Andrade, C., Turrillas, X., Alonso, C., Campo, J.: *In-situ monitoring the realkalisation process by neutron diffraction: Electroosmotic flux and portlandite formation*. In: Cement and Concrete Research 36 (2006), s. 791-800
- [94] Hager I.: *Behaviour of cement concrete at high temperature*. In: Buletin of the Polish Academy of Science Technical Sciences 61 (2013), s. 1- 10.
- [95] Dweck, J., Buchler, P. M., Coelho, A. C. V., Cartledge, F. K.: *Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate*. In: Thermochemica Acta, 346, (2000), s. 105-113.
- [96] Tantawy, M. A.: *Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste*. In: Journal of Materials Science and Chemistry Engineering 5 (2017), s. 33-48.
- [97] Alonso, C., Fernandez, L.: *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*. In: Journal of Materials Science 39 (2004), s. 3015-3024,
- [98] Garbey, K., Bornfeld, M., Beuchle, G., Stemmermann, P.: *Cell dimensions and composition of nanocrystalline calcium silicate hydrate solid solutions. Part 2: X-ray and thermogravimetry study*. In: Journal of the American Ceramic Society 91 (2008), s. 3015-3023.
- [99] Felicetti, R.: *Digital camera colorimetry for the assessment of fire-damaged concrete*. In: Proceedings of the workshop: fire design of concrete structures. Fire design of concrete structures, Milan (2004), s. 211-220.
- [100] Zhang, Q., Ye, G.: *Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature*. In: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 110 (2012), s. 153-158.
- [101] Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillasa, X., Campoc, J.: *Composition and microstructural changes of cement paste s upon heating, as studied by neutron diffraction*. In: Cement and Concrete Research 34, (2004), s. 1633-1644.
- [102] Collepari, M.: *Moderní beton* ISBN: 978-80-87093-75-7 Praha, (2009), 342 s.
- [103] Sudarshan, K., Vyas, A. K.: *Impact of fire on mechanical properties of concrete containing marble waste*. In: Journal of King Saud University – Engineering Science, (2017).

- [104] Rodriguez, E. T., Carbev, K., Merz, D., Black, L., Richardson, I. G.: *Thermal stability of C-S-H phases and applicability of Richardson and Groves' and Richardson C-(A)-S-H(I) models to synthetic C-S-H.*, In: Cement and Concrete Research 93 (2017), pp. 45-56.
- [105] Rankin, G. A., Wright, F. E.: *The ternary system CaO-Al₂O₃-SiO₂.* In: American Journal of Science 39 (2003), s. 1-79.
- [106] McKinsty, S. T., Newnham, R. E.: *Materials Engineering Bonding, Structure, and Structure-Property Relationship.* In: MRS – Materials research society, Cambridge, (2018).
- [107] Sorrell, C. A., Anderson, H. U., Ackermann, R. J.: *Thermal expansion and the high-low transformation in quartz. II. Dilatometric studies,* In: Journal of Applied Crystallography 7 (1974), s. 468-473.
- [108] Bachheimer, J. P., Dolino, G.: *Study of thermal expansion of quartz near a-b phase transition under uniaxial stresses.* In: Journal Ferroelectrics 25 (1980), s. xxx.
- [109] Fire design of concrete structures – structural behaviour and assessment (2008), State-of-art report prepared by Task Group 4.3, ISBN: 978-2-88394-086-4, s. 214.
- [110] Sičáková, A., kol.: *New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Application.* ISBN 987-80-553-0040-5, (2008), s. 156.
- [111] Bažant Z. P.: *Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete.* In: Proceedings of the international workshop on fire performance of high-strength concrete, (1997), s. 155-164.
- [112] Anderberg, Y.: *Spalling phenomena in HPD and OC.* In: Proceedings of the international workshop on fire performance of high-strength concrete, (1997), s. 69-73.
- [113] Bažant, Z. P.: *Concrete creep at high temperature and its interaction with fracture: recent progress, Concreep 7.* In: International conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures 1, (2005), s. 449-460.
- [114] Yufang, F., Lianchong, L.: *Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures.* In: Materials and structures VOL 2010.
- [115] Peng, G. F., Niu, X. J., Shang, Y. J., Zhang, D. P., Chen, X. W., Ding, H.: *Combined curing as a novel approach to improve resistance of ultra-high performance concrete to explosive spalling under high temperature and its mechanical properties.* In: Cement and Concrete Research 109, (2018), s. 147-158.
- [116] Bei, S., Zhixian, L.: *Investigation of spalling resistance of ultra-high-strength concrete under rapid heating and cooling.* In: Case Studies in Construction Materials 4 (2016), s. 146-153.
- [117] Lau, A., Anson, M.: *Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete.* In: Cement and Concrete Research 36 (2006), s. 1698-1707.
- [118] Peng, G. F., Wang, L., Yang, J.: *Title effect of steel fiber on explosive spalling of high performance concrete subjected to high temperatures.* In: AIP Conference Proceedings 1569, (2013).
- [119] Kahanji, Ch., Ali, F., Nadjai, A.: *Explosive Spalling of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete Beams Under Fire.* In: Journal of Structural Fire Engineering 7 (2016), s. 328-348.
- [120] Yüksel, I., Siddique, R., Özkan, Ö.: *Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement.* In: Construction and Building Materials 25, (2011), s. 967-972.
- [121] Saka, T.: *Spalling potential of fire-exposed structural concrete: numerical simulation of the effects of polypropylene fibres.* In: Proceeding of the 1st Workshop on Concrete Spalling Due to Fire Exposure, Leizig, (2009).
- [122] Lui, J. Ch., Tan, K. H.: *Fire resistance of ultra-high performance strain hardening cementitious composite: Residual mechanical properties and spalling resistance.* In: Cement and Concrete Composites 89, (2018), s. 62-75.
- [123] Zhang, D., Dasari, A., Tan, K. H.: *On the mechanism of prevention of explosive spalling of ultra-high performance concrete with polymer fibres.* In: Cement and Concrete Research 113 (2018), s. 169-177.
- [124] Silva, F. A., Mobasher, B., Filho, R. D. T.: *Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites.* In: Cement and Concrete Composites 31 (2009), s. 721-730.
- [125] Kalifa, P., Chéné, G., Gallé, C.: *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure.* In: Cement and Concrete Research 31, (2001), s. 1487-1499.
- [126] Kim, J. K., Moon, X. H., Eo, S. H.: *Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature.* In: Cement and Concrete Research 28 (1998), s. 1761-1773. doi:10.1016/S0008-8846(98)00164-1
- [127] Štěrbá, A., Štěrbá, T.: *The effect of the time on curing and temperature of concrete on its hardening speed.* In: Concrete TKS (2009), s. 6-10.

- [128] Graybeal, B. A.: *Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*. In: *Cement and Concrete Research* 36 (2006) s.xxx
- [129] Taylor, H. F. W., *The Chemistry of Cement* 2nd edition, Thomas Telford Publishing, London, UK.
- [130] Zdeb, T.: *An analysis of the steam curing and autoclaving process parameters for reactive powder concrete*. In: *Construction and Building Materials* 131 (2017), s. 758-766.
- [131] Cheyrezy, M., Maret, V., Frouin, L.: *Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)*. In: *Cement and Concrete Research* 25 (1995) 7, s. 1491-1500.
- [132] Feylessoufi, A., Crespin, M., Dion, P., Bergaya, F., Van Damme, H., Richard, P.: *Controlled rate thermal treatment of reactive powder concretes*. In: *Advanced Cement Based Materials* 6 (1997), s. 21-27.
- [133] Fontana, P., Lehmann, Ch., Müller, U.: *Influence of Hydrothermal Curing on Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete*. In: *Proceeding International Symposium of Brittle Matrix Composites* 9, (2009), s. 391-398.
- [134] Shi, C., Wu, Z., Xiano, J., Wang, D., Hung, Z., Fang, Z.: *A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design*. In: *Construction and Building Materials* 101 (2015), s. 741-751.
- [135] Idorn, G. N.: *5th ICCC Tokyo, Vol. 3, 1961*, s. 411.
- [136] Esmaeili, J., Kasaei, J.: *Effect of Different Curing Regimes on Strength and Transport Properties of UHPC Containing Recycled Steel Tire Wires as Micro Steel Fibers*. In: *First International Symposium on UHPC*, (2016), s. 1-8.
- [137] Elrahman, M. A., Hillemeier, B.: *Influence of hydrothermal conditions with 200 °C and 15.5 bars on the properties of hardened HPC*. In: *Construction and Building Materials* 85, (2015), s. 38-48.
- [138] Elrahman, M. A., Hillemeier, B.: *UHPC Under Intensive Autoclave Cycles for Energy Storage Water Tanks*. In: *Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction*, Ed. M. Schmidt et al., Kassel university press, (2012).
- [139] Holčápek, O., Vogel, F., Konvalinka, P.: *Analysis of Mechanical Properties of Hydrothermally Cured High Strength Cement Matrix for Textile Reinforced Concrete*. In: *Acta Polytechnica* 55, (2015), s. 313-318.
- [140] Holčápek, O.: *High strength concrete matrix for textile reinforced concrete production in special curing conditions*. In: *Material Science Forum* 824, (2015), s. 161-165.
- [141] Holčápek, O.: *Bond Characteristics of TRC Slabs Cured in Autoclave*. In: *Key Engineering Materials* 722, (2016), s. 305-310.
- [142] Gutovic, M., Klimesch, D. S., Ray, A.: *Strength development in hydrothermally treated OPC: CB systems*. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 80, (2005), s. 631-635.
- [143] Klimesch, D. S., Ray, A.: *Incorporating brick fines in cement based building materials*. In: *Proceedings of the International Conference on Composites in Construction, Porto*, (2001), s. 47-49.
- [144] Shatat, M. R.: *Effect of hydrothermal curing on the hydration characteristics of artificial pozzolanic cement pastes placed in closed system*. In: *Applied Clay Science* 96, (2014), s. 110-115.
- [145] Arabi, N., Jauberthie, R.: *Formation of C-S-H in calcium hydroxide-blast furnace slag-quartz-water system in autoclaving conditions*. In: *Advances in Cement Research* 27, (2015), s. 153-162.
- [146] Amin, M. S., Hashem, F. S.: *Hydration characteristics of hydrothermal treated cement kiln dust-sludge-silica fume pastes*. In: *Construction and Building Materials* 25, (2011), s. 1870-1876.
- [147] Shatat, M. R., Ali, G. A. M., Gouda, G. A. H.: *Effect of hydrothermal curing on hydration characteristics of metakaolin-CKD pastes at different temperatures in a closed system*. In: *Beni-Sief University Journal of Basic and Applied Sciences* 5, (2016), s. 299-305.
- [148] Palou, M., Kuzielová, E., Žemlička, M., Živica, V.: *The influence of hexametaphosphate ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) on hydration of calcium aluminate cement under hydrothermal condition*. In: *International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016, Procedia Engineering* 151, (2016), s. 119-126.
- [149] Percival, A., Butler, F. G., Taylor, H. F. W.: *4th ICCC Washington*, (1960), s. 277.
- [150] ČSN EN 196-1 *Metody zkoušení cementu - Část I: Stanovení pevnosti*, (2016).
- [151] RILEM *Determination of the fracture energy of mortars and concrete by means of three-point bend test on notched beams*. In: *Materials and Structures* 18, (1985), s. 285-290.
- [152] Grassl, P., Grégoire, D., Solano, L. R., Cabot, G. P.: *Meso-scale modelling of the size effect on the fracture process zone of concrete*. In: *International Journal of Solids and Structures* 49 (2012), s. 1818-1827.
- [153] Tang, T., Bazant, Z. P., Yang, S., Zollinger, D., *Variable-notch one-size test method for fracture energy and process zone length*, In: *Engineering Fracture Mechanics* 55 (1996), s. 383-404.
- [154] ČSN 73 1371 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*, (2011).

- [155] ČSN EN 993-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – síťový rozbor, (2012).
- [156] Holčápek, O., Kořátková, J., Reiterman, P.: *Development of Composite for Thermal Barriers Reinforced by Ceramic Fibers*. *Advances in Civil Engineering* 3 (2018) s. xxx.
- [157] Holčápek, O., Kořátková, J., Konvalinka, P., Reiterman, P.: *Response of Refractory Cement Based Composite to Gradual Temperature Loading*. In: *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 62, (2018), s. 1-6.
- [158] Sabir, B. B., Wild, S., Bai, J.: *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*. In: *Cement and Concrete Composites* 23 (2001), s. 441-454.
- [159] Badogiannis, E., Kakali, G., Tsivilis, S.: *Metakaolin as supplementary cementitious material, optimization of kaolin to metakaolin conversion*, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 81 (2005), s. 457-462.
- [160] Kannan, D. M., Aboubakr, S. H., EL-Dieb, A. S., Reda Taha M. M.: *High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement*. In: *Construction and Building Materials* 144 (2017), s. 35-41.
- [161] Baronio, G., Binda, L.: *Study of pozzolanity of some bricks and clays*. In: *Construction and Building Materials* 11 (1997), s. 41-46.
- [162] Eze, E. O., Onabanjo, S. A.: *Heating effects on physical and strength characteristics of fireclay from the Nigerian Coal Measures Formation*. In: *Applied Clay Science* 9/5 (1995), s. 397-406.
- [163] Holčápek O., Reiterman, P., Konvalinka, P.: *Mechanical and Rheological Properties of Aluminous Cement under High Temperatures*. In: *Advanced Materials Research* 982, (2014), s. 141-144.
- [164] ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé matly (s použitím sřásacího stolku), (2000).
- [165] Reiterman, P., Jogl, M., Baumelt, V., Seifrt, J.: *Development and mix design of HPC and UHFRC*. In: *Advanced Materials Research* 982, (2014), s. 130-135.
- [166] Holčápek, O., Reiterman, P., Vejmelková, E., Konvalinka, P.: *Mechanical properties of high temperature resistance concrete*. In: *Central Europe towards Sustainable Buildings 2013*, (2013), s. 353-356.
- [167] Holčápek, O., Reiterman, P., Vogel, F., Konvalinka, P.: *Mechanical properties of aluminous cement paste at high temperature*. In: *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, (2013), s. 635-636.
- [168] Holčápek, O., Reiterman, P., Konvalinka, P.: *High temperature composite of aluminous cement with addition of metakaolin and ground bricks dust*. In: *Applied Mechanics and Materials* 486, (2014), s. 406-411.
- [169] Máca, P., Sovják R.: *Resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete to projectile impact*. In: *WIT Transformations on the Built Environment* 126, (2012), s. 261-272.
- [170] Holčápek, O., Reiterman, P., Konvalinka, P.: *Fracture characteristics of refractory composites containing metakaolin and ceramic fibers*. In: *Advances in Mechanical Engineering*, (2015), s. 1-13.
- [171] Reiterman, P., Holčápek, O., Jogl, M., Konvalinka, P.: *Physical and Mechanical Properties of Composites Made with Aluminous Cement and Basalt Fibers Developed for High Temperature Application*. In: *Advances in Materials Science and Engineering*, (2015), s. 1-10.
- [172] Jogl, M., Reiterman, P., Holčápek, O., Konvalinka, P.: *Influence of metakaolin addition on fracture properties of refractory concretes reinforced with basalt fibres*. In: *Cement Wapno Beton* 83, (2016), s. 140-148.
- [173] Holčápek, O., Vogel, F., Vavříník, T., Keppert, M.: *Time Progress of Compressive strength of High Performance Concrete*. In: *Applied Mechanics and Materials* 486, (2014), s. 167-172.
- [174] Cordeiro, R. C.: *Plasma Treatment of Natural Fibers to Improve Fiber-Matrix Compatibility*, Thesis for: Doctor in Science (D.Sc), Advisor: Renata Antoun Simão, (2016).
- [175] Reiterman, P., Holčápek, O., Polozhiy, K., Konvalinka, P.: *Fracture Properties of Cement Pastes Modified by Fine Ground Ceramic Powder*. *Advanced Materials Research* 1054, (2014), s. 182-187.
- [176] Holčápek, O., Machovec, J., Pokorný, J.: *Study of Pore Structure of Refractory Concrete with Ceramic Powder Addition*. In: *Proceedings of International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2018 (ICNAAM 2018)*.
- [178] Holčápek, O., Reiterman, P., Konvalinka, P.: *Experimental investigation of hydrothermal curing influence on mechanical properties of fiber-cement composite*. In: *EAN 2014 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis*, (2014).
- [179] Yazici, H., Deniz, E., Baradan, B.: *The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete*. In: *Construction and Building Materials* 42 (2013), s. 53-63.

[180] Holčapek, O. Kořátková, J.: *The effect of hydrothermal curing on residual mechanical properties of refractory concrete*. In: Proceedings of International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2017 (ICNAAM-2017), Vol. 1978, 2018.

[181] Kakroudi, M. G., Yeugo-Fogaing, E., Gault, C., Huger, M., Chotard, T.: *Effect of thermal treatment on damage mechanical behaviour of refractory castables: Comparison between bauxite and andalusite aggregate*. In: Journal of the European Ceramic Society 28 (2008), s. 2471-2478.

Seznam použitých symbolů, zkratek a veličin

Zkratka	Jednotka	Veličina
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Objemová hmotnost
f_c	[MPa]	Pevnost v tlaku (měřeno na fragmentech po ohybové zkoušce)
f_t	[MPa]	Pevnost v tahu za ohybu
E_{cu}	[GPa]	Dynamický modul pružnosti
l	[m]	Rozpětí podpor
b	[m]	Šířka vzorku
h	[m]	Výška vzorku
$F_{max,t}$	[N]	Maximální síla při ohybové zkoušce
$F_{max,c}$	[N]	Maximální síla při tlakové zkoušce
A	$[\text{m}^2]$	Zkušební plocha vymezená pro tlakovou zkoušku
G_f	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-2}]$	Lomová energie
n	[m]	Hloubka zářezu
v_L	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost impulsu
L	[m]	Délka měřicí základny
T	[s]	Čas průchodu impulsu měřicí základnou
ν_{cu}	[-]	Poissonovo číslo
g	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Tíhové zrychlení
r	[m]	Poloměr kapiláry
Θ	[°]	Úhel smáčení
γ	$[\text{m}\cdot\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Povrchové napětí
$f_{t,d}$	[MPa]	Pevnost v tahu za ohybu deskových vzorků
$F_{max,d}$	[N]	Maximální síla při ohybové zkoušce deskových vzorků
$l_{,d}$	[m]	Rozpětí podpor při ohybové zkoušce deskových vzorků
$h_{,d}$	[m]	Výška deskového vzorku
$b_{,d}$	[m]	Šířka deskového vzorku

Zkratka

Popis

RC	Běžný žárobeton (<i>Regular castabel</i>)
MCC	Žárobeton se středním obsahem cementu (<i>Medium-cement castable</i>)
LCC	Žárobeton s nízkým obsahem cementu (<i>Low-cement castable</i>)
ULCC	Žárobeton s ultra nízkým obsahem cementu (<i>Ultralow-cement castable</i>)
NCC	Bezcementový žárobeton (<i>No-cement castable</i>)

CAC	Hlinitanový cement (<i>Calcium aluminate cement</i>)
CA	Kalcium aluminát (<i>Calcium aluminate</i>)
CA ₂	Dikalcium aluminá (<i>Dicalcium aluminate</i>)
XRD	Rentgenová krystalografie (<i>X-ray diffraction</i>)
DTA	Diferenční termická analýza (<i>Differential thermal analysis</i>)
RGB	Barvený model červená-zelená-modrá (<i>red-green-blue</i>)
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
RCF	Žáruvzdorná keramická vlákna (<i>Refractory ceramic fibers</i>)
TRC	Textilní beton (<i>Textile reinforced concrete</i>)
AR	Odolný vůči alkáliím (<i>Alkali resistance</i>)
HPC	Vysokohodnotný beton (<i>High performance concrete</i>)
UHPC	Ultra-vysokohodnotný beton (<i>Ultra-high performance concrete</i>)
UHPFRC	Ultra-vysokohodnotný beton vyztužený vlákny (<i>Ultra-high fibre reinforced concrete</i>)
CKD	Prach z výroby cementu (<i>Cement kiln dust</i>)
RPC	<i>Reactive powder concrete</i>
SI	Soustava SI (<i>Le Système International d'Unités</i>)

Seznam obrázků

Obrázek 1 Snímek keramické vazby mezi MgO a CaZrO ₃ z elektronového mikroskopu [16].	7
Obrázek 2 Schéma dvou používaných způsobů výroby hlinitanového cementu [27].	10
Obrázek 3 Oblast výskytu hlinitanového cementu v ternárním diagramu C-A-S [30].	10
Obrázek 4 Fázové složení hlinitanových cementů [32].	11
Obrázek 5 Hydratace jednotlivých fází CA a CA ₂ [33].	12
Obrázek 6 Snímek z elektronového mikroskopu uhlíkových vláken TENAX® - A HTC124 v laboratorních podmínkách (průměr 7,5 μm) – vlevo a po výpalu při 600 °C (průměr 3,4 μm) – vpravo.	20
Obrázek 7 TGA a DTA analýza betonu s portlandským cementem, převzato z [96].	22
Obrázek 8 Barevné a strukturální změny v běžném betonu vlivem odlišných teplotních zatížení [100].	23
Obrázek 9 Barevné a strukturální změny betonu vlivem postupně zvyšujícího se teplotního zatížení [91].	23
Obrázek 10 Princip explozivního odprýskávání (vlevo beton nižších pevnostních tříd, vpravo beton vysokých pevností) [111].	24
Obrázek 11 Krychle o hraně 150 mm zhotovená z UHPFRC po účinku teploty v úrovni 400 °C.	26
Obrázek 12 Taylorův diagram: závislost C-S-H na poměru CaO/SiO ₂ v odlišných teplotách [126].	27
Obrázek 13 Závislost užitečných vlastností na podmínkách v autoklávu [127].	27
Obrázek 14 Vyjádření lomové energie jako plochy pod pracovním diagramem z ohybové zkoušky.	33
Obrázek 15 Princip ultrazvukové pulsní metody.	35
Obrázek 16 Schéma základního teplotního zatěžování (600 °C a 1000 °C).	36
Obrázek 17 Přípravek pro autoklávování vzorků 40×40×160 mm, vyvinutý pro potřeby disertační práce.	37
Obrázek 18 Schématický řez autoklávem.	38
Obrázek 19 Autokláv ATH-70 (JUMO GmbH&Co.).	38
Obrázek 20 Výsledek prosévací zkoušky použitého čedičového kameniva.	40
Obrázek 21 Použité čedičové kamenivo z lomu Dobkovičky frakce 2-5 mm.	40
Obrázek 22 Zleva: cihelný prach, metakaolin Mefisto L05 a hlinitanový cement Secar®71.	42
Obrázek 23 Čedičová vlákna 12,7 mm (vlevo) a keramická vlákna Izowat 12G (vpravo) použitá v experimentálním programu.	43
Obrázek 24 Zpracovatelnost čerstvých cementových past v závislosti na vodním součiniteli.	45
Obrázek 25 Vyhodnocení objemových hmotností cementových past v závislosti na vodním součiniteli.	46
Obrázek 26 Vyhodnocení pevnosti v tlaku cementových past v závislosti na vodním součiniteli.	46
Obrázek 27 Pracovní diagramy vybraných cementových past po vysušení při 105 °C.	47
Obrázek 28 Pracovní diagramy vybraných cementových past po výpalu při 600 °C.	48
Obrázek 29 Pracovní diagramy vybraných cementových past po výpalu při 1000 °C.	48
Obrázek 30 Vyhodnocení lomových energií cementových past v závislosti na vodním součiniteli.	48
Obrázek 31 Vyhodnocení pevnosti v tlaku cementových past v závislosti na vodním součiniteli.	49
Obrázek 32 Ukládání čerstvé směsi obsahující keramická vlákna Izowat 12G a metakaolin.	55
Obrázek 33 Uchování vzorků s různou příměsí metakaolinu a cihelného prachu v uzavřeném boxu s vysokou relativní vlhkostí.	55
Obrázek 34 Zpracovatelnost čerstvých směsí s čedičovými vlákny a cihelným prachem.	56
Obrázek 35 Zpracovatelnost čerstvých směsí s keramickými vlákny	57

Obrázek 36 <i>Ilustrace barevných změn vlivem výpalu na vzorcích se substitucí cihelným prachem (shora 105 °C, 600 °C a 1000 °C); jedná se o vzorky po provedené ohybové zkoušce, kdy vpravo je možné vidět vnitřní strukturu materiálu.</i>	58
Obrázek 37 <i>Hodnoty objemových hmotností směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	59
Obrázek 38 <i>Hodnoty objemových hmotností směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	59
Obrázek 39 <i>Hodnoty objemových hmotností směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	60
Obrázek 40 <i>Hodnoty objemových hmotností směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	60
Obrázek 41 <i>Hodnoty pevností v tlaku směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	61
Obrázek 42 <i>Hodnoty pevností v tlaku směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	61
Obrázek 43 <i>Hodnoty pevností v tlaku směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	62
Obrázek 44 <i>Hodnoty pevností v tlaku směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	62
Obrázek 45 <i>Hodnoty pevností v tahu za ohybu směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	63
Obrázek 46 <i>Hodnoty pevností v tahu za ohybu směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	63
Obrázek 47 <i>Hodnoty pevností v tahu za ohybu směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	64
Obrázek 48 <i>Hodnoty pevností v tahu za ohybu směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	64
Obrázek 49 <i>Hodnoty lomových energií směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	65
Obrázek 50 <i>Hodnoty lomových energií směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a čedičových vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	65
Obrázek 51 <i>Hodnoty lomových energií směsí s odlišnou dávkou cihelného prachu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	66
Obrázek 52 <i>Hodnoty lomových energií směsí s odlišnou dávkou metakaolinu a keramických vláken v závislosti na teplotním zatížení.</i>	66
Obrázek 53 <i>Schéma provedeného teplotního zatěžování.</i>	68
Obrázek 54 <i>Hodnoty objemové hmotnosti směsí s čedičovými vlákny.</i>	69
Obrázek 55 <i>Hodnoty objemové hmotnosti směsí s keramickými vlákny.</i>	70
Obrázek 56 <i>Hodnoty pevnosti v tlaku směsí s čedičovými vlákny.</i>	71
Obrázek 57 <i>Hodnoty pevnosti v tlaku směsí s keramickými vlákny.</i>	71
Obrázek 58 <i>Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu směsí s čedičovými vlákny.</i>	72
Obrázek 59 <i>Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu směsí s keramickými vlákny.</i>	72
Obrázek 60 <i>Hodnoty lomových energií směsí s čedičovými vlákny.</i>	73
Obrázek 61 <i>Hodnoty lomových energií směsí s keramickými vlákny.</i>	73
Obrázek 62 <i>Hodnoty dynamického modulu pružnosti směsí s čedičovými vlákny.</i>	74
Obrázek 63 <i>Hodnoty dynamického modulu pružnosti směsí s keramickými vlákny.</i>	75

Obrázek 64 Barevné změny čedičových vláken – vlevo při laboratorních podmínkách a vpravo po výpalu při 1000 °C	77
Obrázek 65 Snímek čedičových vláken Basaltex, nezatížených vysokými teplotami, při zvětšení 2000×, včetně údaje o průměru vlákna.	78
Obrázek 66 Snímek čedičových vláken Basaltex po výpalu při 600 °C, při zvětšení 2000×, včetně údaje o průměru vlákna.	78
Obrázek 67 Snímek čedičových vláken Basaltex po výpalu při 1000 °C, při zvětšení 2000×, včetně údaje o průměru vlákna.	79
Obrázek 68 Kumulativní křivky studovaných směsí.	80
Obrázek 69 Vyhodnocení celkové a efektivní porozity.	81
Obrázek 70 Snímek z elektronového mikroskopu – křemičité kamenivo bez zatížení teplotou.	82
Obrázek 71 Snímek z elektronového mikroskopu – křemičité kamenivo zatížené teplotou 600 °C.	83
Obrázek 72 Porovnání objemových hmotností (vliv nežáruvzdorných materiálů).	84
Obrázek 73 Porovnání pevností v tlaku (vliv nežáruvzdorných materiálů).	85
Obrázek 74 Porovnání pevností v tahu za ohybu (vliv nežáruvzdorných materiálů).	86
Obrázek 75 Porovnání lomových energií (vliv nežáruvzdorných materiálů).	86
Obrázek 76 Schéma tlaku a teploty v průběhu hydrotermálního ošetřování.	88
Obrázek 77 Vyhodnocení tlakových pevností vzorků ošetřovaných v hydrotermálních podmínkách ve studovaných teplotních režimech.	91
Obrázek 78 Vyhodnocení pevností v tahu za ohybu vzorků ošetřovaných v hydrotermálních podmínkách ve studovaných teplotních režimech.	91
Obrázek 79 Schéma cyklického teplotního zatěžování (naznačeny 3 zatěžovací teplotní cykly).	95
Obrázek 80 Schéma uspořádání ohybové zkoušky žáruvzdorných desek.	95
Obrázek 81 Uspořádání ohybové zkoušky žáruvzdorných desek.	96
Obrázek 82 Vliv odlišných teplot a množství čedičových vláken na hodnoty objemové hmotnosti.	97
Obrázek 83 Vyhodnocení pevností v tahu za ohybu.	98
Obrázek 84 Záznam z ohybové zkoušky desek s obsahem 0,25 % čedičových vláken.	99
Obrázek 85 Záznam z ohybové zkoušky desek s obsahem 0,5 % čedičových vláken.	99
Obrázek 86 Záznam z ohybové zkoušky desek s obsahem 1,0 % čedičových vláken.	100
Obrázek 87 Barevné změny vlivem účinku vysokých teplot (105 °C, 600 °C a 1000 °C).	101
Obrázek 88 Segregace jemných podílů u směsi C_0,25_C5 (vlevo), zatímco směs C_1,0_C5 (vpravo) je homogenní.	101
Obrázek 89 Trhliny na povrchu desky s 0,50 % čedičových vláken po cyklickém zatěžování v úrovni 1000 °C.	101

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdělení hlinitanových cementů dle obsahu oxidu hlinitého.	9
Tabulka 2 Rychlost tuhnutí jednotlivých složek hlinitanového cement.	13
Tabulka 3 Přehled dostupných informací o vybraných hlinitanových cementech různých výrobců.....	15
Tabulka 4 Chemické složení použitého cementu, metakaolinu, cihelného prachu, keramických a čedičových vláken (% hmotnosti).	41
Tabulka 5 Vlastnosti a charakteristiky cementových past.	50
Tabulka 6 Složení a popis jednotlivých směsí s čedičovými vlákny.	52
Tabulka 7 Složení a popis jednotlivých směsí s keramickými vlákny.	53
Tabulka 8 Složení použitých směsí pro detailnější teplotní zatěžování..	67
Tabulka 9 Složení směsí kompozitů s nežáruvzdornými kompozity a porovnávaného žáruvzdorného kompozitu.	81
Tabulka 10 Vyhodnocené vlastnosti studovaného kompozitu a nežáruvzdorných kompozitůt.	83
Tabulka 11 Výsledky směsí bez obsahu cihelného prachu či metakaolinu..	88
Tabulka 12 Výsledky směsí bez obsahu cihelného prachu či metakaolinu.	88
Tabulka 13 Výsledky hydrotermálního ošetřování směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.....	89
Tabulka 14 Výsledky hydrotermálního ošetřování směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.	90
Tabulka 15 Hodnoty objemové hmotnosti a lomové energie autoklávovaných vzorků s keramickými vlákny.. . .	92
Tabulka 16 Hodnoty pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu autoklávovaných vzorků s keramickými vlákny.	92
Tabulka 17 Závislost objemové hmotnosti na teplotních zatěžováních.	96
Tabulka 18 Vypočtená pevnost v tahu za ohybu a příslušná maximální deformace.....	97

Přílohy

- Příloha č. 1** Výsledky objemových hmotností směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 2** Výsledky objemových hmotností směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 3** Pevnost v tlaku směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 4** Pevnost v tlaku směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 5** Pevnost v tahu za ohybu směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 6** Pevnost v tahu za ohybu směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 7** Lomové energie směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 8** Lomové energie směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 9** Výsledky objemových hmotností směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 10** Výsledky objemových hmotností směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 11** Pevnost v tlaku směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 12** Pevnost v tlaku směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 13** Pevnost v tahu za ohybu směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 14** Pevnost v tahu za ohybu směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 15** Lomové energie směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 16** Lomové energie směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 17** Sledované mechanické a základní vlastnosti směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 18** Sledované mechanické a základní vlastnosti směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 19** Sledované mechanické a základní vlastnosti směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 20** Sledované mechanické a základní vlastnosti směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.
- Příloha č. 21** Sledované mechanické a základní vlastnosti směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 22** Sledované mechanické a základní vlastnosti směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.
- Příloha č. 23** Technický list hlinitanového cementu.
- Příloha č. 24** Technický list plastifikátoru Sika.
- Příloha č. 25** Technický list keramických vláken.
- Příloha č. 26** Technický list metakaolinu MEFISTO L05.

Příloha č. 1 Výsledky objemových hmotností směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.

Směs	Objemová hmotnost					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[kg·m ⁻³]	[%]	[kg·m ⁻³]	[%]	[kg·m ⁻³]	[%]
C_0,0_R	2330	100 %	2260	97,0 %	2185	93,8 %
C_0,0_C1	2325	100 %	2215	95,3 %	2150	92,5 %
C_0,0_C2	2325	100 %	2250	96,8 %	2200	94,6 %
C_0,0_C3	2320	100 %	2245	96,8 %	2195	94,6 %
C_0,0_C4	2355	100 %	2260	96,0 %	2230	94,7 %
C_0,0_C5	2290	100 %	2200	96,1 %	2180	95,2 %
C_0,25_R	2280	100 %	2175	95,4 %	2130	93,4 %
C_0,25_C1	2325	100 %	2165	93,1 %	2155	92,7 %
C_0,25_C2	2370	100 %	2180	92,0 %	2165	91,4 %
C_0,25_C3	2360	100 %	2190	92,8 %	2125	90,0 %
C_0,25_C4	2340	100 %	2150	91,9 %	2135	91,2 %
C_0,25_C5	2345	100 %	2140	91,3 %	2125	90,6 %
C_0,5_R	2440	100 %	2320	95,1 %	2270	93,0 %
C_0,5_C1	2440	100 %	2320	95,1 %	2280	93,4 %
C_0,5_C2	2425	100 %	2285	94,2 %	2255	93,0 %
C_0,5_C3	2400	100 %	2240	93,3 %	2240	93,1 %
C_0,5_C4	2340	100 %	2215	94,7 %	2205	94,2 %
C_0,5_C5	2305	100 %	2135	92,6 %	2125	92,2 %
C_1,0_R	2250	100 %	2180	96,9 %	2120	94,2 %
C_1,0_C1	2410	100 %	2275	94,4 %	2225	92,3 %
C_1,0_C2	2415	100 %	2290	94,6 %	2220	91,9 %
C_1,0_C3	2340	100 %	2225	95,1 %	2135	91,2 %
C_1,0_C4	2310	100 %	2200	95,2 %	2110	91,3 %
C_1,0_C5	2250	100 %	2105	93,6 %	2070	91,8 %
C_2,0_R	2400	100 %	2225	92,7 %	2210	92,1 %
C_2,0_C1	2345	100 %	2195	97,8 %	2165	96,4 %
C_2,0_C2	2330	100 %	2210	94,8 %	2150	92,3 %
C_2,0_C3	2265	100 %	2140	94,5 %	2125	93,8 %
C_2,0_C4	2265	100 %	2130	94,0 %	2095	92,5 %
C_2,0_C5	2275	100 %	2120	93,2 %	2085	91,6 %
C_4,0_R	2185	100 %	2070	94,7 %	1955	89,5 %
C_4,0_C1	2095	100 %	1940	92,6 %	1885	90,0 %
C_4,0_C2	2065	100 %	1905	92,3 %	1845	89,3 %
C_4,0_C3	2000	100 %	1900	95,0 %	1815	90,8 %
C_4,0_C4	2005	100 %	1870	93,3 %	1810	90,3 %
C_4,0_C5	1995	100 %	1840	92,2 %	1800	90,2 %

Příloha č. 2 Výsledky objemových hmotností směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.

Směs	Objemová hmotnost					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[kg·m ⁻³]	[%]	[kg·m ⁻³]	[%]	[kg·m ⁻³]	[%]
C_0,0_R	2330	100 %	2260	97,0 %	2185	93,8 %
C_0,0_M1	2325	100 %	2215	95,3 %	2150	92,5 %
C_0,0_M2	2325	100 %	2250	96,8 %	2200	94,6 %
C_0,0_M3	2320	100 %	2245	96,8 %	2195	94,6 %
C_0,0_M4	2355	100 %	2260	96,0 %	2230	94,7 %
C_0,0_M5	2290	100 %	2200	96,1 %	2180	95,2 %
C_0,25_R	2280	100 %	2175	95,4 %	2130	93,4 %
C_0,25_M1	2370	100 %	2260	95,4 %	2220	92,8 %
C_0,25_M2	2370	100 %	2230	94,1 %	2180	92,0 %
C_0,25_M3	2320	100 %	2190	94,4 %	2150	92,7 %
C_0,25_M4	2290	100 %	2120	92,6 %	2110	92,1 %
C_0,25_M5	2270	100 %	2120	93,4 %	2050	90,3 %
C_0,5_R	2440	100 %	2320	95,1 %	2270	93,0 %
C_0,5_M1	2420	100 %	2240	92,6 %	2230	92,1 %
C_0,5_M2	2410	100 %	2210	91,7 %	2200	91,3 %
C_0,5_M3	2410	100 %	2200	91,3 %	2160	89,6 %
C_0,5_M4	2380	100 %	2185	91,8 %	2155	90,5 %
C_0,5_M5	2340	100 %	2180	93,2 %	2150	91,9 %
C_1,0_R	2250	100 %	2180	96,9 %	2120	94,2 %
C_1,0_M1	2300	100 %	2150	93,5 %	2170	94,3 %
C_1,0_M2	2240	100 %	2130	95,1 %	2120	94,6 %
C_1,0_M3	2230	100 %	2130	95,5 %	2110	94,6 %
C_1,0_M4	2200	100 %	2060	93,6 %	2090	95,0 %
C_1,0_M5	2115	100 %	2050	96,9 %	2050	96,9 %
C_2,0_R	2400	100 %	2225	92,7 %	2210	92,1 %
C_2,0_M1	2385	100 %	2250	94,3 %	2210	92,7 %
C_2,0_M2	2375	100 %	2220	93,5 %	2190	92,2 %
C_2,0_M3	2370	100 %	2200	92,8 %	2160	91,1 %
C_2,0_M4	2310	100 %	2160	93,5 %	2130	92,2 %
C_2,0_M5	2280	100 %	2120	93,0 %	2100	92,1 %
C_4,0_R	2185	100 %	2055	94,1 %	1970	90,2 %
C_4,0_M1	2170	100 %	2065	95,2 %	1960	90,3 %
C_4,0_M2	2105	100 %	2030	96,4 %	1945	92,4 %
C_4,0_M3	2090	100 %	1995	95,5 %	1925	92,1 %
C_4,0_M4	2075	100 %	1965	94,7 %	1915	92,3 %
C_4,0_M5	2065	100 %	1950	94,4 %	1905	92,3 %

Příloha č. 3 Pevnost v tlaku směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.

Směs	Pevnost v tlaku					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
C_0,0_R	47,7	100 %	31,1	65,2 %	18,8	39,4 %
C_0,0_C1	46,9	100 %	39,4	84,0 %	22,6	48,2 %
C_0,0_C2	48,5	100 %	40,5	83,5 %	20,9	43,1 %
C_0,0_C3	50,3	100 %	45,0	89,5 %	21,5	42,7 %
C_0,0_C4	53,3	100 %	49,2	92,3 %	23,5	44,1 %
C_0,0_C5	48,9	100 %	41,2	84,3 %	29,9	61,1 %
C_0,25_R	113,5	100 %	68,3	60,2 %	27,1	23,9 %
C_0,25_C1	132,5	100 %	74,2	56,0 %	28,5	21,5 %
C_0,25_C2	133,0	100 %	89,1	67,0 %	37,7	28,3 %
C_0,25_C3	130,3	100 %	87,0	66,8 %	38,8	29,8 %
C_0,25_C4	126,0	100 %	85,3	67,7%	37,8	30,0 %
C_0,25_C5	97,0	100 %	62,6	64,5 %	31,5	32,5 %
C_0,5_R	100,5	100 %	64,1	63,8 %	36,2	36,0 %
C_0,5_C1	95,3	100 %	63,6	66,7 %	40,8	42,8 %
C_0,5_C2	91,7	100 %	59,8	65,2 %	39,6	43,2 %
C_0,5_C3	84,5	100 %	56,2	66,5 %	34,4	40,7 %
C_0,5_C4	82,1	100 %	54,8	66,7 %	35,1	42,8 %
C_0,5_C5	80,2	100 %	52,0	64,8 %	35,2	43,9 %
C_1,0_R	93,9	100 %	52,7	56,1 %	26,4	28,1 %
C_1,0_C1	95,7	100 %	55,9	58,4 %	31,1	32,5 %
C_1,0_C2	98,7	100 %	53,6	54,3 %	32,3	32,7 %
C_1,0_C3	94,5	100 %	51,4	54,4 %	28,6	30,3 %
C_1,0_C4	92,1	100 %	50,3	54,6 %	28,1	30,5 %
C_1,0_C5	89,0	100 %	48,7	54,7 %	27,6	31,0 %
C_2,0_R	94,1	100 %	58,6	62,3 %	29,8	31,7 %
C_2,0_C1	90,0	100 %	55,1	61,2 %	27,1	30,1 %
C_2,0_C2	93,2	100 %	57,9	62,1 %	29,5	31,7 %
C_2,0_C3	90,2	100 %	54,6	60,5 %	24,3	26,9 %
C_2,0_C4	97,9	100 %	62,3	63,6 %	32,4	33,1 %
C_2,0_C5	99,4	100 %	64,4	64,8 %	33,3	33,5 %
C_4,0_R	99,1	100 %	58,8	59,3 %	21,1	21,3 %
C_4,0_C1	87,5	100 %	42,8	48,9 %	20,0	22,9 %
C_4,0_C2	92,4	100 %	40,7	49,4 %	22,4	27,2 %
C_4,0_C3	79,8	100 %	39,7	49,7 %	18,9	23,7 %
C_4,0_C4	78,4	100 %	37,9	48,3 %	20,8	26,5 %
C_4,0_C5	77,0	100 %	35,4	46,0 %	21,8	28,3 %

Příloha č. 4 Pevnost v tlaku směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.

Směs	Pevnost v tlaku					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
C_0,0_R	47,7	100 %	31,1	65,2 %	18,8	39,4 %
C_0,0_M1	46,9	100 %	39,4	84,0 %	22,6	48,2 %
C_0,0_M2	48,5	100 %	40,5	83,5 %	20,9	43,1 %
C_0,0_M3	50,3	100 %	45,0	89,5 %	21,5	42,7 %
C_0,0_M4	53,3	100 %	49,2	92,3 %	23,5	44,1 %
C_0,0_M5	48,9	100 %	41,2	84,3 %	29,9	61,1 %
C_0,25_R	113,5	100 %	68,3	60,2 %	27,1	23,9 %
C_0,25_M1	91,4	100 %	56,1	61,4 %	37,8	41,4 %
C_0,25_M2	105,8	100 %	72,5	68,5 %	42,7	40,4 %
C_0,25_M3	98,2	100 %	67,3	68,5 %	35,8	36,5 %
C_0,25_M4	103,6	100 %	72,7	70,2 %	39,1	37,7 %
C_0,25_M5	96,0	100 %	55,6	57,9 %	31,2	32,5 %
C_0,5_R	100,5	100 %	64,1	63,8 %	36,2	36,0 %
C_0,5_M1	88,7	100 %	62,4	70,3 %	36,5	41,1 %
C_0,5_M2	95,0	100 %	63,5	66,8 %	37,1	39,1 %
C_0,5_M3	101,4	100 %	64,0	63,1 %	34,2	33,7 %
C_0,5_M4	110,3	100 %	68,9	62,5 %	38,9	35,3 %
C_0,5_M5	115,8	100 %	77,4	66,8 %	36,6	31,6 %
C_1,0_R	93,9	100 %	52,7	56,1 %	26,4	28,1 %
C_1,0_M1	83,9	100 %	48,8	58,2 %	27,7	33,0 %
C_1,0_M2	73,5	100 %	41,4	56,3 %	26,5	36,1 %
C_1,0_M3	78,5	100 %	51,4	65,5 %	28,6	36,4 %
C_1,0_M4	77,3	100 %	44,7	57,8 %	27,6	35,7 %
C_1,0_M5	91,5	100 %	59,6	65,1 %	36,4	39,8 %
C_2,0_R	94,1	100 %	58,6	62,3 %	29,8	31,7 %
C_2,0_M1	99,9	100 %	56,9	57,0 %	29,7	29,7 %
C_2,0_M2	106,0	100 %	64,2	60,6 %	29,1	27,5 %
C_2,0_M3	107,6	100 %	70,2	65,2 %	30,5	28,3 %
C_2,0_M4	104,9	100 %	83,0	79,1 %	28,2	26,9 %
C_2,0_M5	106,6	100 %	89,4	83,9 %	30,7	28,8 %
C_4,0_R	99,1	100 %	58,8	59,3 %	21,1	21,3 %
C_4,0_M1	92,6	100 %	35,7	38,6 %	20,0	21,6 %
C_4,0_M2	89,2	100 %	43,7	49,0 %	29,6	33,2 %
C_4,0_M3	86,1	100 %	45,3	52,6 %	31,4	36,5 %
C_4,0_M4	86,5	100 %	39,1	45,2 %	22,3	25,8 %
C_4,0_M5	81,3	100 %	30,3	37,3 %	21,8	26,8 %

Příloha č. 5 Pevnost v tahu za ohybu směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.

Směs	Pevnost v tahu za ohybu					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
C_0,0_R	5,2	100 %	2,1	40,4 %	1,5	28,8 %
C_0,0_C1	5,4	100 %	4,2	77,8 %	2,3	42,6 %
C_0,0_C2	5,5	100 %	3,8	69,1 %	2,0	36,4 %
C_0,0_C3	6,7	100 %	4,1	61,2 %	2,2	32,8 %
C_0,0_C4	8,2	100 %	5,0	60,0 %	2,0	24,4 %
C_0,0_C5	7,9	100 %	4,4	55,7 %	3,3	41,8 %
C_0,25_R	13,2	100 %	5,7	43,2 %	3,4	25,8 %
C_0,25_C1	15,8	100 %	6,5	41,1 %	3,0	19,0 %
C_0,25_C2	16,7	100 %	7,4	44,3 %	4,3	25,7 %
C_0,25_C3	16,0	100 %	8,6	53,8 %	4,3	26,9 %
C_0,25_C4	15,1	100 %	7,9	52,3 %	4,8	31,8 %
C_0,25_C5	13,5	100 %	6,5	48,1 %	3,2	23,7 %
C_0,5_R	11,9	100 %	5,9	49,6 %	3,7	31,1 %
C_0,5_C1	12,8	100 %	6,3	49,2 %	3,8	29,7 %
C_0,5_C2	13,1	100 %	6,5	49,6 %	3,6	27,5 %
C_0,5_C3	12,9	100 %	5,8	45,0 %	3,6	27,9 %
C_0,5_C4	12,5	100 %	5,7	45,6 %	3,4	27,2 %
C_0,5_C5	12,9	100 %	6,1	47,3 %	3,2	24,8 %
C_1,0_R	13,4	100 %	6,2	50,0 %	3,7	29,8 %
C_1,0_C1	12,3	100 %	5,8	47,2 %	3,7	30,1 %
C_1,0_C2	12,0	100 %	5,8	48,3 %	3,9	32,5 %
C_1,0_C3	11,6	100 %	6,0	51,7 %	4,1	35,3 %
C_1,0_C4	11,2	100 %	5,5	49,1 %	4,0	35,7 %
C_1,0_C5	10,7	100 %	5,0	46,7 %	3,8	36,4 %
C_2,0_R	12,3	100 %	6,6	53,7 %	3,8	30,9 %
C_2,0_C1	14,1	100 %	7,1	50,4 %	3,8	27,0 %
C_2,0_C2	13,9	100 %	7,3	52,5 %	3,7	26,6 %
C_2,0_C3	13,6	100 %	6,9	50,7 %	3,7	29,4 %
C_2,0_C4	13,4	100 %	6,8	50,7 %	4,2	31,3 %
C_2,0_C5	12,3	100 %	6,9	56,1 %	4,2	34,1 %
C_4,0_R	18,0	100 %	9,8	54,4 %	3,9	21,7 %
C_4,0_C1	18,39	100 %	7,7	40,7 %	4,0	21,2 %
C_4,0_C2	19,3	100 %	8,1	42,0 %	4,2	21,8 %
C_4,0_C3	18,9	100 %	8,5	45,0 %	3,6	19,0 %
C_4,0_C4	18,3	100 %	6,9	37,7 %	4,1	22,4 %
C_4,0_C5	17,9	100 %	6,5	36,3 %	4,4	24,6 %

Příloha č. 6 Pevnost v tahu za ohybu směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.

Směs	Pevnost v tahu za ohybu					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
C_0,0_R	5,2	100 %	2,1	40,4 %	1,5	28,8 %
C_0,0_M1	4,2	100 %	4,2	77,8 %	2,3	42,6 %
C_0,0_M2	3,8	100 %	3,8	69,1 %	2,0	36,4 %
C_0,0_M3	4,1	100 %	4,1	61,2 %	2,2	32,8 %
C_0,0_M4	5,0	100 %	5,0	61,0 %	2,0	24,4 %
C_0,0_M5	4,4	100 %	4,4	55,7 %	3,3	41,8 %
C_0,25_R	13,2	100 %	5,7	43,2 %	3,4	25,8 %
C_0,25_M1	12,3	100 %	6,1	49,6 %	3,4	27,6 %
C_0,25_M2	12,1	100 %	6,1	50,4 %	4,2	34,7 %
C_0,25_M3	12,7	100 %	6,6	52,0 %	3,5	27,6 %
C_0,25_M4	11,5	100 %	5,1	44,3 %	3,6	31,3 %
C_0,25_M5	13,2	100 %	5,7	43,2 %	3,1	23,5 %
C_0,5_R	11,9	100 %	5,9	49,6 %	3,7	31,1 %
C_0,5_M1	13,5	100 %	5,4	40,0 %	3,6	26,7 %
C_0,5_M2	12,8	100 %	5,7	44,5 %	3,5	27,3 %
C_0,5_M3	11,6	100 %	5,9	50,9 %	3,6	31,0 %
C_0,5_M4	12,4	100 %	6,8	54,8 %	4,2	33,9 %
C_0,5_M5	11,9	100 %	7,1	59,7 %	4,7	39,5 %
C_1,0_R	13,4	100 %	6,2	46,3 %	3,7	27,6 %
C_1,0_M1	13,3	100 %	5,7	42,9 %	2,9	21,8 %
C_1,0_M2	10,3	100 %	5,4	51,4 %	3,1	30,1 %
C_1,0_M3	11,6	100 %	6,0	51,7 %	4,1	35,3 %
C_1,0_M4	10,4	100 %	5,3	51,0 %	3,2	30,8 %
C_1,0_M5	13,0	100 %	8,4	64,4 %	4,3	33,1 %
C_2,0_R	12,3	100 %	6,6	53,7 %	3,8	30,9 %
C_2,0_M1	15,2	100 %	6,7	44,1 %	3,7	24,3 %
C_2,0_M2	14,2	100 %	7,7	54,2 %	3,7	26,1 %
C_2,0_M3	13,6	100 %	7,9	58,1 %	3,8	27,9 %
C_2,0_M4	14,9	100 %	8,3	55,7 %	3,5	23,5 %
C_2,0_M5	15,0	100 %	10,8	72,0 %	3,2	21,3 %
C_4,0_R	18,0	100 %	9,8	54,4 %	3,9	21,7 %
C_4,0_M1	17,9	100 %	6,7	7,4 %	4,0	22,3 %
C_4,0_M2	18,1	100 %	7,0	38,7 %	4,3	23,8 %
C_4,0_M3	17,8	100 %	6,9	38,8 %	4,5	25,3 %
C_4,0_M4	16,2	100 %	6,1	37,7 %	3,9	24,1 %
C_4,0_M5	13,3	100 %	4,8	36,1 %	3,0	22,6 %

Příloha č. 7 Lomové energie směsí s cihelným prachem a čedičovými vlákny.

Směs	Lomová energie					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[J·m ⁻²]	[%]	[J·m ⁻²]	[%]	[J·m ⁻²]	[%]
C_0,0_R	50,1	100 %	47,6	95,0 %	39,6	79,0 %
C_0,0_C1	65,8	100 %	60,4	91,8 %	52,3	79,5 %
C_0,0_C2	68,4	100 %	63,5	92,8 %	58,6	85,7 %
C_0,0_C3	75,3	100 %	65,5	87,0 %	55,6	73,8 %
C_0,0_C4	87,8	100 %	72,3	82,3 %	51,2	58,3 %
C_0,0_C5	70,5	100 %	55,4	78,6 %	53,4	75,7 %
C_0,25_R	110,3	100 %	60,4	54,8 %	22,9	20,8 %
C_0,25_C1	135,9	100 %	68,7	50,6 %	52,9	38,9 %
C_0,25_C2	179,4	100 %	82,0	45,7 %	66,1	36,8 %
C_0,25_C3	209,2	100 %	93,9	44,9 %	70,7	33,8 %
C_0,25_C4	185,2	100 %	84,3	45,5 %	78,0	42,1 %
C_0,25_C5	160,4	100 %	79,3	49,4 %	77,9	48,6 %
C_0,5_R	275,5	100 %	128,3	46,6 %	82,5	29,9 %
C_0,5_C1	315,2	100 %	135,4	3,0 %	89,2	28,3 %
C_0,5_C2	302,4	100 %	142,8	47,2 %	95,6	31,6 %
C_0,5_C3	295,8	100 %	128,9	43,6 %	68,7	23,2 %
C_0,5_C4	281,5	100 %	117,4	41,7 %	72,5	25,8 %
C_0,5_C5	303,8	100 %	148,4	48,8 %	70,6	23,2 %
C_1,0_R	207,0	100 %	71,4	34,5 %	63,9	30,9 %
C_1,0_C1	218,6	100 %	112,6	51,5 %	68,7	31,4 %
C_1,0_C2	215,2	100 %	99,5	46,2 %	65,0	30,2 %
C_1,0_C3	216,0	100 %	86,9	40,2 %	61,2	28,3 %
C_1,0_C4	227,6	100 %	85,6	37,6 %	62,1	27,3 %
C_1,0_C5	238,8	100 %	94,7	39,7 %	72,9	30,5 %
C_2,0_R	127,2	100 %	94,3	74,1 %	57,0	44,8 %
C_2,0_C1	182,7	100 %	109,5	59,9 %	63,9	35,0 %
C_2,0_C2	179,9	100 %	118,2	65,7 %	72,5	40,3 %
C_2,0_C3	165,8	100 %	121,8	73,5 %	64,2	38,7 %
C_2,0_C4	142,3	100 %	95,4	67,0 %	58,9	41,4 %
C_2,0_C5	133,4	100 %	89,4	67,0 %	67,3	50,4 %
C_4,0_R	115,2	100 %	81,0	70,3 %	61,0	55,6 %
C_4,0_C1	121,6	100 %	75,5	62,1 %	72,4	59,5 %
C_4,0_C2	132,1	100 %	68,5	51,9 %	65,8	49,8 %
C_4,0_C3	125,5	100 %	57,4	45,7 %	52,8	42,1 %
C_4,0_C4	102,3	100 %	62,3	60,9 %	60,0	58,7 %
C_4,0_C5	99,7	100 %	59,7	59,9 %	52,6	52,8 %

Příloha č. 8 Lomové energie směsí s metakaolinem a čedičovými vlákny.

Směs	Lomová energie					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[J·m ⁻²]	[%]	[J·m ⁻²]	[%]	[J·m ⁻²]	[%]
C_0,0_R	50,1	100 %	47,6	95,0 %	39,6	79,0 %
C_0,0_M1	65,8	100 %	60,4	91,8 %	52,3	79,5 %
C_0,0_M2	68,4	100 %	63,5	92,8 %	58,6	85,7 %
C_0,0_M3	75,3	100 %	65,5	87,0 %	55,6	73,8 %
C_0,0_M4	87,8	100 %	72,3	83,3 %	51,2	58,3 %
C_0,0_M5	70,5	100 %	55,4	78,6 %	53,4	75,7 %
C_0,25_R	110,3	100 %	60,4	54,8 %	22,9	20,8 %
C_0,25_M1	103,1	100 %	76,9	74,6 %	60,2	58,4 %
C_0,25_M2	102,5	100 %	116,7	113,9 %	60,7	59,2 %
C_0,25_M3	96,8	100 %	113,3	117,0 %	47,9	49,5 %
C_0,25_M4	91,8	100 %	97,4	106,1 %	67,3	73,3 %
C_0,25_M2	131,1	100 %	121,5	92,7 %	52,3	39,9 %
C_0,5_R	275,5	100 %	128,3	46,6 %	82,5	29,9 %
C_0,5_M1	375,0	100 %	214,9	57,3 %	86,6	23,1 %
C_0,5_M2	345,0	100 %	185,9	53,9 %	72,8	21,1 %
C_0,5_M3	262,2	100 %	165,0	62,9 %	69,0	26,3 %
C_0,5_M4	260,7	100 %	157,1	60,3 %	89,4	34,3 %
C_0,5_M5	244,1	100 %	147,3	60,3 %	95,7	39,2 %
C_1,0_R	207,0	100 %	71,4	34,5 %	63,9	30,9 %
C_1,0_M1	215,0	100 %	78,6	36,6 %	59,6	27,7 %
C_1,0_M2	166,1	100 %	82,9	49,9 %	81,1	48,8 %
C_1,0_M3	156,3	100 %	125,9	80,6 %	106,25	67,9 %
C_1,0_M4	135,0	100 %	139,0	103,0 %	85,0	63,0 %
C_1,0_M5	145,2	100 %	144,6	99,6 %	97,2	66,9 %
C_2,0_R	127,2	100 %	94,3	74,1 %	57,0	44,8 %
C_2,0_M1	184,0	100 %	95,2	51,7 %	68,1	37,0 %
C_2,0_M2	195,0	100 %	119,3	61,2 %	79,7	40,9 %
C_2,0_M3	187,0	100 %	107,0	57,2 %	61,0	32,6 %
C_2,0_M4	213,9	100 %	102,6	48,0 %	65,9	30,8 %
C_2,0_M5	221,2	100 %	87,0	39,3 %	71,0	32,1 %
C_4,0_R	115,2	100 %	81,0	70,3 %	97,6	84,7 %
C_4,0_M1	202,4	100 %	150,2	74,2 %	89,9	44,4 %
C_4,0_M2	224,1	100 %	174,8	78,0 %	106,7	47,6 %
C_4,0_M3	221,1	100 %	171,5	77,6 %	68,5	31,0 %
C_4,0_M4	249,2	100 %	142,3	57,1 %	87,1	35,0 %
C_4,0_M5	186,4	100 %	74,1	39,8 %	72,3	38,8 %

Příloha č. 9 Výsledky objemových hmotností směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.

Směs	Objemová hmotnost					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[kg·m ⁻³]	[%]	[kg·m ⁻³]	[%]	[kg·m ⁻³]	[%]
C_0,0_R	2330	100 %	2260	97,0 %	2185	93,8 %
C_0,0_C1	2390	100 %	2350	98,3 %	2100	87,9 %
C_0,0_C2	2270	100 %	2180	96,0 %	2160	95,2 %
C_0,0_C3	2300	100 %	2200	95,7 %	2140	93,0 %
C_0,0_C4	2370	100 %	2260	95,4 %	2220	93,7 %
C_0,0_C5	2280	100 %	2160	94,7 %	2050	89,9 %
C_0,25_R	2300	100 %	2260	98,3 %	2190	95,2 %
C_0,25_C1	2375	100 %	2250	94,7 %	2180	91,7 %
C_0,25_C2	2340	100 %	2240	95,7 %	2200	94,0 %
C_0,25_C3	2320	100 %	2210	95,3 %	2150	92,6 %
C_0,25_C4	2310	100 %	2200	95,2 %	2160	93,5 %
C_0,25_C5	2290	100 %	2180	95,2 %	2110	92,0 %
C_4,0_R	2350	100 %	2220	94,5 %	2215	94,3 %
C_4,0_C1	2350	100 %	2220	94,5 %	2195	93,4 %
C_4,0_C2	2300	100 %	2195	95,4 %	2170	94,3 %
C_4,0_C3	2280	100 %	2170	95,2 %	2090	91,7 %
C_4,0_C4	2260	100 %	2105	93,1 %	2070	91,6 %
C_4,0_C5	2235	100 %	2135	95,5 %	2120	94,9 %
C_8,0_R	2310	100 %	2240	97,0 %	2170	93,9 %
C_8,0_C1	2220	100 %	2100	94,6 %	2090	94,1 %
C_8,0_C2	2200	100 %	2120	96,4 %	2060	93,6 %
C_8,0_C3	2195	100 %	2090	95,2 %	2075	94,5 %
C_8,0_C4	2180	100 %	2040	93,6 %	2040	93,6 %
C_8,0_C5	2180	100 %	2050	94,0 %	2030	93,1 %

Příloha č. 10 Výsledky objemových hmotností směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.

Směs	Objemová hmotnost					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[kg·m ⁻³]	[%]	[kg·m ⁻³]	[%]	[kg·m ⁻³]	[%]
C_0,0_R	2330	100 %	2260	97,0 %	2185	93,8 %
C_0,0_M1	2390	100 %	2350	98,3 %	2100	87,9 %
C_0,0_M2	2270	100 %	2180	96,0 %	2160	95,2 %
C_0,0_M3	2300	100 %	2200	95,7 %	2140	93,0 %
C_0,0_M4	23700	100 %	2260	95,4 %	2220	93,7 %
C_0,0_M5	2280	100 %	2160	94,7 %	2050	89,9 %
C_0,25_R	2300	100 %	2260	98,3 %	2190	95,2 %
C_0,25_M1	2390	100 %	2350	98,3 %	2110	88,3 %
C_0,25_M2	2270	100 %	2180	96,0 %	2160	95,2 %
C_0,25_M3	2290	100 %	2200	95,7 %	2140	93,0 %
C_0,25_M4	2360	100 %	2250	94,9 %	2220	93,7 %
C_0,25_M5	2290	100 %	2160	94,7 %	2060	90,4 %
C_4,0_R	2350	100 %	2220	94,5 %	2215	94,3 %
C_4,0_M1	2365	100 %	2230	94,3 %	2210	93,4 %
C_4,0_M2	2270	100 %	2190	96,5 %	2130	93,8 %
C_4,0_M3	2290	100 %	2180	95,2 %	2130	93,0 %
C_4,0_M4	2290	100 %	2150	93,9 %	2130	93,0 %
C_4,0_M5	2260	100 %	2150	95,1 %	2130	94,2 %
C_8,0_R	2295	100 %	2240	97,6 %	2170	94,6 %
C_8,0_M1	2230	100 %	2150	96,4 %	2125	95,3 %
C_8,0_M2	2195	100 %	2110	96,1 %	2075	94,5 %
C_8,0_M3	2175	100 %	2075	95,4 %	2060	94,7 %
C_8,0_M4	2230	100 %	2125	95,3 %	2105	94,4 %
C_8,0_M5	2215	100 %	2080	93,9 %	2065	93,2 %

Příloha č. 11 Pevnost v tlaku směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.

Směs	Pevnost v tlaku					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
C_0,0_R	47,7	100 %	31,1	65,2 %	18,8	39,4 %
C_0,0_C1	39,6	100 %	39,4	99,5 %	16,8	42,4 %
C_0,0_C2	41,55	100 %	29,5	71,1 %	24,4	58,8 %
C_0,0_C3	54,2	100 %	33,5	61,8 %	23,3	43,0 %
C_0,0_C4	85,1	100 %	49,2	57,8 %	29,2	34,3 %
C_0,0_C5	73,9	100 %	41,2	55,8 %	30,0	40,6 %
C_0,25_R	59,8	100 %	55,2	92,3 %	19,9	33,3 %
C_0,25_C1	68,3	100 %	47,1	69,0 %	27,0	39,5 %
C_0,25_C2	66,8	100 %	47,0	70,4 %	23,6	35,3 %
C_0,25_C3	63,5	100 %	42,5	66,9 %	21,6	34,5 %
C_0,25_C4	54,5	100 %	41,0	75,2 %	30,3	55,6 %
C_0,25_C5	64,2	100 %	36,7	57,2 %	28,8	44,9 %
C_4,0_R	78,1	100 %	57,3	73,4 %	20,9	26,8 %
C_4,0_C1	73,8	100 %	58,4	79,1 %	22,3	30,2 %
C_4,0_C2	63,4	100 %	54,6	86,1 %	24,2	38,2 %
C_4,0_C3	58,6	100 %	44,0	75,1 %	27,9	47,6 %
C_4,0_C4	56,0	100 %	39,8	71,1 %	32,8	57,1 %
C_4,0_C5	55,3	100 %	48,4	87,5 %	32,8	59,3 %
C_8,0_R	47,5	100 %	30,6	64,4 %	27,9	58,7 %
C_8,0_C1	64,4	100 %	42,4	65,8 %	22,5	34,9 %
C_8,0_C2	64,7	100 %	39,7	61,4 %	20,6	31,8 %
C_8,0_C3	59,0	100 %	40,2	68,1 %	25,1	42,5 %
C_8,0_C4	60,2	100 %	41,3	68,6 %	25,7	42,7 %
C_8,0_C5	60,7	100 %	42,1	69,4 %	28,2	46,5 %

Příloha č. 12 Pevnost v tlaku směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.

Směs	Pevnost v tlaku					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
K_0,0_R	47,7	100 %	31,1	65,2 %	18,8	39,4 %
K_0,0_M1	39,6	100 %	39,4	99,5 %	16,8	42,4 %
K_0,0_M2	41,5	100 %	29,5	71,1 %	24,4	58,8 %
K_0,0_M3	54,2	100 %	33,5	64,8 %	23,3	43,0 %
K_0,0_M4	85,1	100 %	49,2	57,8 %	29,2	34,3 %
K_0,0_M5	73,9	100 %	41,2	55,8 %	30,0	40,6 %
K_0,25_R	57,8	100 %	55,2	95,5 %	19,9	34,4 %
K_0,25_M1	83,4	100 %	54,7	65,6 %	28,0	33,6 %
K_0,25_M2	61,8	100 %	31,7	50,8 %	17,8	28,8 %
K_0,25_M3	50,2	100 %	38,9	77,5 %	24,4	48,6 %
K_0,25_M4	57,0	100 %	37,5	65,8 %	27,7	48,6 %
K_0,25_M5	61,5	100 %	43,9	71,4 %	26,7	43,4 %
K_4,0_R	78,1	100 %	57,3	73,4 %	20,9	26,8 %
K_4,0_M1	84,6	100 %	60,1	71,0 %	21,6	25,5 %
K_4,0_M2	59,8	100 %	40,9	68,4 %	22,6	37,8 %
K_4,0_M3	63,2	100 %	41,8	66,1 %	28,2	44,6 %
K_4,0_M4	72,2	100 %	56,3	78,0 %	32,7	45,3 %
K_4,0_M5	71,8	100 %	33,5	46,7 %	20,2	28,1 %
K_8,0_R	47,5	100 %	30,6	64,4 %	17,9	37,7 %
K_8,0_M1	42,8	100 %	32,1	75,0 %	19,2	44,9 %
K_8,0_M2	53,4	100 %	34,7	65,0 %	22,3	41,8 %
K_8,0_M3	48,7	100 %	33,4	68,6 %	25,2	51,7 %
K_8,0_M4	60,3	100 %	43,6	72,3 %	28,5	47,3 %
K_8,0_M5	77,9	100 %	54,1	69,4 %	31,7	40,7 %

Příloha č. 13 Pevnost v tahu za ohybu směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.

Směs	Pevnost v tahu za ohybu					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
C_0,0_R	5,2	100 %	2,1	40,4 %	1,5	28,8 %
C_0,0_C1	3,9	100 %	0,6	15,4 %	0,9	23,1 %
C_0,0_C2	4,8	100 %	2,2	45,8 %	1,9	39,6 %
C_0,0_C3	5,3	100 %	2,0	37,7 %	2,2	41,5 %
C_0,0_C4	9,1	100 %	3,2	35,2 %	2,8	30,8 %
C_0,0_C5	6,9	100 %	4,5	65,2 %	2,5	36,2 %
C_0,25_R	8,2	100 %	5,0	61,0 %	4,4	53,7 %
C_0,25_C1	10,8	100 %	4,8	44,4 %	3,3	30,6 %
C_0,25_C2	9,0	100 %	3,4	37,8 %	2,5	27,8 %
C_0,25_C3	8,6	100 %	3,4	39,5 %	2,5	29,1 %
C_0,25_C4	8,0	100 %	4,5	56,3 %	2,4	30,0 %
C_0,25_C5	7,3	100 %	4,0	54,8 %	2,3	31,5 %
C_4,0_R	8,2	100 %	3,1	37,8 %	2,0	24,4 %
C_4,0_C1	9,6	100 %	5,0	52,1 %	2,3	24,0 %
C_4,0_C2	9,1	100 %	4,0	44,0 %	2,8	30,8 %
C_4,0_C3	10,0	100 %	4,8	48,0 %	2,7	27,0 %
C_4,0_C4	8,2	100 %	4,4	53,7 %	4,0	48,8 %
C_4,0_C5	6,6	100 %	4,4	66,7 %	3,9	59,1 %
C_8,0_R	8,5	100 %	3,7	43,5 %	2,1	24,7 %
C_8,0_C1	9,7	100 %	4,2	43,3 %	2,4	24,7 %
C_8,0_C2	8,5	100 %	4,2	49,4 %	2,2	25,9 %
C_8,0_C3	8,4	100 %	3,7	44,0 %	2,8	33,3 %
C_8,0_C4	8,9	100 %	4,8	53,9 %	3,1	34,8 %
C_8,0_C5	10,4	100 %	4,7	45,2 %	3,3	31,7 %

Příloha č. 14 Pevnost v tahu za ohybu směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.

Směs	Pevnost v tahu za ohybu					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
K_0,0_R	5,2	100 %	2,1	40,4 %	1,5	28,8 %
K_0,0_M1	3,9	100 %	0,6	15,4 %	0,9	23,1 %
K_0,0_M2	4,8	100 %	2,2	45,8 %	1,9	39,6 %
K_0,0_M3	5,3	100 %	2,0	37,7 %	2,2	41,5 %
K_0,0_M4	9,1	100 %	3,2	35,2 %	2,8	30,8 %
K_0,0_M5	6,9	100 %	4,5	65,2 %	2,5	36,2 %
K_0,25_R	8,2	100 %	4,4	53,7 %	2,0	24,4 %
K_0,25_M1	10,1	100 %	4,6	45,5 %	2,4	23,8 %
K_0,25_M2	7,3	100 %	3,0	41,1 %	2,0	27,4 %
K_0,25_M3	7,4	100 %	3,3	44,6 %	2,1	28,4 %
K_0,25_M4	10,1	100 %	4,8	47,5 %	2,7	26,7 %
K_0,25_M5	10,0	100 %	4,6	46,0 %	2,5	25,0 %
K_4,0_R	8,2	100 %	3,1	37,8 %	2,0	24,4 %
K_4,0_M1	8,5	100 %	3,6	42,4 %	2,2	25,9 %
K_4,0_M2	8,6	100 %	4,4	51,2 %	2,5	29,1 %
K_4,0_M3	8,4	100 %	4,8	57,1 %	3,2	38,1 %
K_4,0_M4	13,2	100 %	5,3	40,2 %	3,4	25,8 %
K_4,0_M5	9,3	100 %	3,8	40,9 %	2,3	24,7 %
K_8,0_R	8,4	100 %	3,7	44,0 %	2,1	25,0 %
K_8,0_M1	7,4	100 %	3,5	47,3 %	2,6	35,1 %
K_8,0_M2	8,4	100 %	4,2	50,0 %	2,8	33,3 %
K_8,0_M3	8,6	100 %	5,0	58,1 %	3,4	39,5 %
K_8,0_M4	10,1	100 %	4,0	39,6 %	3,7	36,6 %
K_8,0_M5	12,0	100 %	5,4	45,0 %	3,4	28,3 %

Příloha č. 15 Lomové energie směsí s cihelným prachem a keramickými vlákny.

Směs	Lomová energie					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[J·m ⁻²]	[%]	[J·m ⁻²]	[%]	[J·m ⁻²]	[%]
C_0,0_R	50,1	100 %	47,6	95,0 %	39,6	79,0 %
C_0,0_C1	67,8	100 %	48,9	72,1 %	42,7	63,0 %
C_0,0_C2	50,1	100 %	40,1	80,0 %	44,6	89,0 %
C_0,0_C3	95,4	100 %	82,1	86,1 %	43,4	45,5 %
C_0,0_C4	118,7	100 %	70,3	59,2 %	75,6	63,7 %
C_0,0_C5	103,5	100 %	95,1	91,9 %	85,6	82,7 %
C_0,25_R	70,1	100 %	47,6	67,9 %	39,6	56,5 %
C_0,25_C1	94,5	100 %	62,4	66,0 %	51,5	54,5 %
C_0,25_C2	90,4	100 %	60,6	67,0 %	56,1	62,1 %
C_0,25_C3	99,0	100 %	57,6	58,2 %	51,8	52,3 %
C_0,25_C4	127,6	100 %	78,3	61,4 %	53,1	41,6 %
C_0,25_C5	114,7	100 %	73,5	64,1 %	46,7	40,7 %
C_4,0_R	106,7	100 %	79,1	74,1 %	49,3	46,2 %
C_4,0_C1	157,8	100 %	106,9	68,0 %	47,0	29,9 %
C_4,0_C2	171,8	100 %	101,8	59,4 %	53,1	31,0 %
C_4,0_C3	165,1	100 %	99,2	60,1 %	47,1	28,5 %
C_4,0_C4	156,7	100 %	102,4	65,3 %	72,3	46,1 %
C_4,0_C5	158,6	100 %	117,5	74,1 %	84,3	53,2 %
C_8,0_R	121,5	100 %	95,5	78,6 %	31,9	26,3 %
C_8,0_C1	138,6	100 %	110,3	79,6 %	37,2	26,8 %
C_8,0_C2	135,8	100 %	91,1	67,1 %	38,1	28,1 %
C_8,0_C3	146,0	100 %	85,0	58,2 %	33,7	23,1 %
C_8,0_C4	162,4	100 %	71,0	43,7 %	61,2	37,7 %
C_8,0_C5	145,3	100 %	79,3	54,6 %	46,6	32,1 %

Příloha č. 16 Lomové energie směsí s metakaolinem a keramickými vlákny.

Směs	Lomová energie					
	105 °C		600 °C		1000 °C	
	[J·m ⁻²]	[%]	[J·m ⁻²]	[%]	[J·m ⁻²]	[%]
K_0,0_R	50,1	100 %	47,6	95,0 %	39,6	79,0 %
K_0,0_M1	67,8	100 %	48,9	72,1 %	42,7	63,0 %
K_0,0_M2	50,1	100 %	40,1	80,0 %	44,6	89,0 %
K_0,0_M3	95,4	100 %	82,1	86,1 %	43,4	45,5 %
K_0,0_M4	118,7	100 %	70,3	59,2 %	75,6	63,7 %
K_0,0_M5	103,5	100 %	95,1	91,9 %	85,6	82,7 %
K_0,25_R	140,5	100 %	76,9	54,7 %	37,0	26,3 %
K_0,25_M1	191,2	100 %	60,8	31,8 %	47,6	24,9 %
K_0,25_M2	139,1	100 %	31,3	22,5 %	49,6	35,7 %
K_0,25_M3	155,4	100 %	47,4	30,5 %	45,4	29,2 %
K_0,25_M4	118,0	100 %	86,8	73,6 %	88,8	75,3 %
K_0,25_M5	163,5	100 %	90,6	55,4 %	107,6	65,8 %
K_4,0_R	86,7	100 %	79,1	91,2 %	49,3	56,9 %
K_4,0_M1	87,8	100 %	80,4	91,6 %	54,0	61,5 %
K_4,0_M2	132,2	100 %	81,7	61,8 %	43,2	32,7 %
K_4,0_M3	147,3	100 %	106,4	72,2 %	57,8	39,2 %
K_4,0_M4	193,3	100 %	94,4	48,8 %	75,5	39,1 %
K_4,0_M5	312,3	100 %	167,5	53,6 %	122,8	39,3 %
K_8,0_R	121,5	100 %	95,5	78,6 %	31,9	26,3 %
K_8,0_M1	158,1	100 %	94,6	59,8 %	33,1	20,9 %
K_8,0_M2	140,5	100 %	80,9	57,6 %	34,9	24,8 %
K_8,0_M3	136,9	100 %	98,3	71,8 %	72,5	53,0 %
K_8,0_M4	166,9	100 %	71,5	42,8 %	65,8	39,4 %
K_8,0_M5	181,1	100 %	107,8	59,5 %	62,5	34,5 %

Příloha č. 17 Sledované mechanické a základní vlastnosti směsi s metakaolinem a čedičovými vlákny (C_0,5_M5) – výpal 100 °C až 1000 °C; f_c [MPa], f_t [MPa], E_{cu} [GPa], G_f [$J \cdot m^{-2}$], ρ [$kg \cdot m^{-3}$].

	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C
f_c	131,9	125,0	107,3	78,3	77,4	73,4	67,6	68,4	56,3	43,4
%	100 %	94,8 %	81,3 %	59,4 %	58,7 %	55,6 %	51,3 %	51,9 %	42,7 %	32,9 %
f_t	17,0	16,8	9,6	8,3	7,1	6,5	6,3	5,7	5,5	5,2
%	100 %	98,8 %	56,5 %	48,8 %	41,8 %	38,2 %	37,1 %	33,5 %	32,4 %	30,6 %
E_{cu}	48,4	47,2	37,3	21,4	18,6	12,2	11,9	11,2	10,4	9,4
%	100 %	97,5 %	77,1 %	44,2 %	38,4 %	25,2 %	24,6 %	23,1	21,5 %	19,4 %
G_f	614,0	471,7	311,9	245,0	235,9	208,0	194,0	180,1	160,6	152,0
%	100 %	76,8 %	50,8 %	39,9 %	38,4 %	33,9 %	31,6 %	29,3 %	26,2	16,6
ρ	2330	2300	2280	2260	2225	2180	2170	2160	2135	2095
%	100 %	98,7 %	97,9 %	97,0 %	95,5 %	93,6 %	93,1 %	92,7 %	91,6 %	89,9 %

Příloha č. 18 Sledované mechanické a základní vlastnosti směsi s metakaolinem a čedičovými vlákny (C_1,0_M5) – výpal 100 °C až 1000 °C; f_c [MPa], f_t [MPa], E_{cu} [GPa], G_f [$J \cdot m^{-2}$], ρ [$kg \cdot m^{-3}$].

	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C
f_c	104,5	98,4	85,1	62,4	60,7	57,5	56,6	52,5	42,6	29,8
%	100 %	94,2 %	81,4 %	59,7 %	58,1 %	55,0 %	54,2 %	50,2 %	40,8 %	28,5 %
f_t	17,5	15,2	10,1	7,9	7,4	7,2	6,9	6,0	5,5	5,0
%	100 %	86,9 %	57,7 %	45,1 %	42,3 %	41,1 %	39,4 %	34,3 %	31,4 %	31,4 %
E_{cu}	42,7	39,9	28,8	17,6	15,7	9,1	10,0	9,5	8,4	8,5
%	100 %	93,4 %	67,4 %	41,2 %	36,8 %	21,3 %	23,4 %	22,2 %	19,7 %	19,9 %
G_f	644,5	519,2	291,3	272,9	257,5	243,7	203,6	182,7	197,8	153,7
%	100 %	80,6 %	45,2 %	42,3 %	40,0 %	37,8 %	31,6 %	28,3 %	30,7 %	23,8 %
ρ	2265	2210	2195	2095	2080	2075	2065	2055	2040	2035
%	100 %	97,6 %	96,9 %	92,5 %	91,8 %	91,6 %	92,2 %	90,7 %	90,1 %	89,8 %

Příloha č. 19 Sledované mechanické a základní vlastnosti směsi s cihelným prachem a čedičovými vlákny (C_0,5_C5) – výpal 100 °C až 1000 °C; f_c [MPa], f_t [MPa], E_{cu} [GPa], G_f [$J \cdot m^{-2}$], ρ [$kg \cdot m^{-3}$].

	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C
f_c	99,0	93,3	81,2	68,9	65,3	59,4	57,3	52,5	47,8	34,7
%	100 %	94,2 %	82,0 %	69,6 %	66,0 %	60,0 %	57,9 %	53,0 %	48,3 %	35,1 %
f_t	14,1	14,7	9,7	7,3	7,0	6,3	5,1	4,8	5,1	4,9
%	100 %	104,3%	68,8 %	51,8 %	49,6 %	44,7 %	36,2 %	34,0 %	36,2 %	34,8 %
E_{cu}	42,9	42,6	33,6	19,0	14,5	13,3	9,2	8,9	8,6	8,0
%	100 %	99,3 %	78,3 %	44,3 %	33,8 %	31,0 %	21,4 %	20,7 %	20,0 %	18,6 %
G_f	525,3	400,0	220,4	234,6	218,3	191,5	185,5	176,6	156,6	108,8
%	100 %	76,1 %	42,0 %	44,7 %	41,6 %	36,5 %	35,3 %	33,6 %	29,8 %	20,7 %
ρ	2310	2300	2255	2230	2200	2185	2165	2160	2140	2125
%	100 %	99,6 %	97,6 %	96,5 %	95,2 %	94,6 %	93,7 %	93,5 %	92,6 %	92,0 %

Příloha č. 20 Sledované mechanické a základní vlastnosti směsi s cihelným prachem a čedičovými vlákny (C_1,0_C5) – výpal 100 °C až 1000 °C; f_c [MPa], f_t [MPa], E_{cu} [GPa], G_f [$J \cdot m^{-2}$], ρ [$kg \cdot m^{-3}$].

	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C
f_c	89,4	58,2	48,9	45,0	44,4	38,6	34,2	34,4	30,9	25,7
%	100 %	65,1 %	54,7 %	50,3 %	49,7 %	43,2 %	38,3 %	38,5 %	34,6 %	28,7 %
f_t	11,3	9,2	7,3	6,5	5,2	4,9	4,5	4,3	3,9	3,4
%	100 %	81,4 %	64,6 %	57,5 %	46,0 %	43,4 %	39,8 %	38,1 %	34,5 %	30,1 %
E_{cu}	30,9	30,8	25,2	15,8	13,9	9,0	8,7	8,8	8,3	8,0
%	100 %	99,7 %	81,6 %	51,1 %	45,0 %	29,1 %	28,2 %	28,5 %	26,9 %	25,9 %
G_f	575,4	434,4	247,3	242,3	236,3	222,6	201,6	193,1	179,7	137,4
%	100 %	75,5 %	43,0 %	42,1 %	41,1 %	38,7 %	35,0 %	33,6 %	31,2 %	23,9 %
ρ	2250	2195	2175	2145	2115	2100	2095	2095	2080	2070
%	100 %	97,6 %	96,7 %	95,3 %	94,0 %	93,3 %	93,1 %	93,1 %	92,4 %	92,0 %

Příloha č. 21 Sledované mechanické a základní vlastnosti směsi s cihelným prachem a keramickými vlákny (K_4,0_C5) – výpal 100 °C až 1000 °C; f_c [MPa], f_t [MPa], E_{cu} [GPa], G_f [$J \cdot m^{-2}$], ρ [$kg \cdot m^{-3}$].

	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C
f_c	69,7	63,8	52,4	49,3	45,5	44,9	39,4	38,8	31,3	26,6
%	100 %	91,5 %	75,2 %	70,7 %	65,3 %	64,4 %	56,5 %	55,7 %	44,9 %	38,2 %
f_t	9,5	7,8	6,1	5,4	5,7	5,3	5,1	4,1	3,7	3,7
%	100 %	82,1 %	64,2 %	56,8 %	60,0 %	55,8 %	53,7 %	43,2 %	38,9 %	38,9 %
E_{cu}	36,4	35,2	28,2	22,3	14,7	13,6	9,9	8,1	7,6	6,9
%	100 %	96,7 %	77,5 %	61,3 %	40,4 %	37,4 %	27,2 %	22,3 %	20,9 %	19,0 %
G_f	203,4	195,7	177,1	162,9	122,4	101,5	103,8	76,9	82,5	71,8
%	100 %	96,2 %	87,1 %	80,1 %	60,2 %	49,9 %	51,0 %	37,8 %	40,6 %	35,3 %
ρ	2190	2165	2155	2110	2070	2050	2040	2035	2030	2025
%	100 %	98,9 %	98,4 %	96,3 %	94,5 %	93,6 %	93,2 %	92,9 %	92,7 %	92,5 %

Příloha č. 22 Sledované mechanické a základní vlastnosti směsi s metakaolinem a keramickými vlákny (K_4,0_M5) – výpal 100 °C až 1000 °C; f_c [MPa], f_t [MPa], E_{cu} [GPa], G_f [$J \cdot m^{-2}$], ρ [$kg \cdot m^{-3}$].

	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C	1000 °C
f_c	72,5	67,3	55,7	53,4	47,3	44,4	42,5	37,1	34,1	32,7
%	100 %	92,8 %	76,8 %	73,7 %	65,2 %	61,2 %	58,6 %	51,2 %	47,0 %	45,1 %
f_t	10,1	9,5	7,7	5,6	5,5	5,4	5,4	4,6	4,4	2,2
%	100 %	94,1 %	76,2 %	55,4 %	54,5 %	53,5 %	53,5 %	45,5 %	43,6 %	21,8 %
E_{cu}	37,5	36,3	28,6	24,1	17,2	15,6	13,4	9,0	7,7	7,6
%	100 %	96,8 %	76,3 %	64,3 %	45,9 %	41,6 %	35,7 %	24,0 %	20,5 %	20,3 %
G_f	193,3	199,7	167,5	145,0	128,9	94,0	98,3	87,4	78,9	75,5
%	100 %	103,3 %	86,7 %	75,0 %	66,7 %	48,6 %	50,9 %	45,2 %	40,8 %	39,1 %
ρ	2200	2195	2180	2120	2090	2090	2070	2065	2060	2050
%	100 %	99,8 %	99,1 %	96,4 %	95,0 %	95,0 %	94,1 %	93,9 %	93,6 %	93,2 %

Příloha č. 23 Technický list hlinitanového cementu.

Product data sheet

Reference PDS-US-S71-8/06

Secar[®] 71

Updated 8/24/2006

1 General Characteristics

All calcium aluminate cements possess the general properties of **good refractoriness** and **high early strength** when used alone as the principal hydraulic binder. The latter property is often used in combination with other minerals such as calcium sulfate and/or Portland cement to produce high early strengths and/or shrinkage compensation through the formation of ettringite.

Composed mainly of calcium aluminates, SECAR[®] 71 can be used as the primary binder or in combination with other reactive minerals.

Using SECAR[®] 71 as a refractory cement normally finds it as the primary binder in mortars and concretes exposed to refractory temperatures. SECAR[®] 71 is preferred by many for high duty refractory concretes due to a very low iron oxide content of approximately 0.1%.

SECAR[®] 71 is the reference product for high technology deflocculated castable systems such as LCC, ULCC, shotcrete and pumpable refractories. Its controlled mineralogy gives the formulator great flexibility in castable design and also gives good compatibility with micro silica.

For construction product formulators SECAR[®] 71 can be used in combination with other reactive minerals to form the binder in formulations requiring a white base color.

SECAR[®] 71 additions to Portland cement will accelerate the initial set from hours to minutes depending on the type and mill of manufactured Portland cement.

Calcium aluminate cements do not release Calcium Hydroxide as a hydration product when used as the sole hydraulic compound in a formulation. This

imparts good refractoriness, chemical resistance and eliminates the major cause of efflorescence.

As a binder, SECAR[®] 71 reacts with most organic and mineral additives to achieve exceptional flow with high early compressive strength.

SECAR[®] 71 is a white in color. Colorimetry data is available on request.

SECAR[®] 71 does not contain any additives.

SECAR[®] 71 does not contain crystalline silica.

2 Specifications

SECAR[®] 71 produced and distributed in North America adheres to the following specifications:

Chemical constituents (% by XRF chemistry)			
Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
≥ 68.5	≤ 31.0	≤ 0.8	≤ 0.4

- Blaine fineness: 3700-4500 cm²/g (ASTM C204)

Physical Properties (using EN-196 sand mortar)

- Flow at 30 min: ≥ 60% (ASTM C1437)
- Vicat Initial Set: ≥ 175 min.
- Vicat Final Set: ≤ 290 min

Modified ASTM C191 - Needle weight is 1000g, needle diameter is 1.16 mm, samples immersed in water.

- Compressive strength (ASTM C349)
 - 6 hr ≥ 1250 psi (8.6 MPa)
 - 24 hr ≥ 4600 psi (31.7 MPa)

For detailed test procedures, please contact a Kerneos Technical or Quality Manager.

Kerneos Inc.
1316 Priority Lane Chesapeake, VA 23324
Phone: (757) 284-3200 - FAX: (757) 284-3300

Page 1 (2)



ISO 9001



Příloha č. 23 Technický list hlinitanového cementu.

Product data sheet

Reference PDS-US-S71-8/06

3 Additional Physical properties

- Bulk density: 1.04 – 1.23 g/cm³ (64.9 – 77.1 lb/ft³)
- Specific gravity: approx. 2.94
- Residue at 90 microns (+170 mesh): < 5%
- Pyrometric cone equivalent - ASTM C24 on neat cement paste: 19-20 (≈ 2845° F or 1563° C)

Minor constituents (% by XRF Chemistry)			
TiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O+Na ₂ O
< 0.4	< 0.5	< 0.3	< 0.5

Mineralogy

- Principal mineralogical phase:
calcium aluminate CA
 - Secondary phase:
CA₂
- C = CaO A = Al₂O₃ S = SiO₂ F = Fe₂O₃

4 Packaging & Shelf Life

SECAR[®] 71 is available palletized in 100 lb bags or 3000 lb. super sacks.

SECAR[®] 71 packaging is designed to protect it from humidity. However, as with all hydraulic binders, it is recommended that SECAR[®] 71 not be placed outdoors or in direct contact with the ground. When correctly stored in dry conditions, the properties of SECAR[®] 71 will remain within specification limit for at least 6 months. In most cases, its properties will be retained for over a year.

KERNEOS LIMITED WARRANTY

Kerneos warrants that this product, at the time of shipment, conforms to the Specifications set forth in section 2 of this Product Data Sheet. All other information provided in this Product Data Sheet is for guidance only. ALL OTHER WARRANTIES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE EXCLUDED. Kerneos' sole obligation and the sole and exclusive remedy under this limited warranty shall be the replacement of any nonconforming product, or, at Kerneos' option, the refund of the purchase price. No warranty is given for any technical advice or recommendations provided by Kerneos. Buyer waives all claims under this limited warranty unless it has given written notice of nonconformity within 30 days of delivery.

Kerneos Inc.
1316 Priority Lane Chesapeake, VA 23324
Phone: (757) 284-3200 - FAX: (757) 284-3300

Page 2 (2)



ISO 9001

Příloha č. 24 Technický list plastifikátoru Sika.

Technický list
 Datum vydání 06/2016
 Identifikační č.: 02 13 01 01 100 0 001339
 Verze č. 01
 Sika® ViscoCrete®-1035 CZ

Sika® ViscoCrete®-1035 CZ

Univerzální a vysoce účinný superplastifikátor pro transportbetony

Construction

Popis výrobku	Sika® ViscoCrete®-1035 CZ je univerzální, velmi účinný superplastifikátor pro transportbetony – nižších i vyšších pevnostních tříd.
Použití	Sika® ViscoCrete®-1035 CZ je vhodný především pro: <ul style="list-style-type: none"> ■ transportbeton stupně konzistence F4 až F6 ■ samozhutitelné betony (SCC) ■ transportbeton s nízkou ztrátou konzistence ■ transportbeton s dlouhou dobou dopravy nebo zpracování ■ transportbeton s nízkým vodním součinitelem ■ vysoce pevnostní a hutné betony
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> ■ prostorové rozptýlení jemných podílů ■ zlepšuje dispergaci a smáčení zrn cementu ■ snižuje třecí síly mezi zrny cementu a kameniva ■ snižuje potřebu záměsové vody ■ má prodlouženou dobu účinnosti <p>U transportbetonu Sika® ViscoCrete®-1035 CZ umožňuje:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ snížení vodního součinitele a tím zvýšení hutnosti a pevnosti ■ měkkou konzistenci a tím značné snížení nákladů na zpracování a zhutňování ■ při pomalejší ztrátě konzistence dosáhnout delší doby zpracovatelnosti při vyšších teplotách betonu
Zkušební zprávy	
Testy	Vydáno Prohlášení o vlastnostech č. 02 13 01 01 100 0 001339 1180, certifikováno Oznameným subjektem č. 1020, certifikát 1020-CPR-020027779 Splňuje požadavky EN 934-1 a EN 934-2: přísady do betonu, tab. 3.1/3.2
Údaje o výrobku	
Barva	Nažloutlá kapalina.
Balení	Kanýstr: 30 kg Sud: 200 kg Kontejner: 1000 kg Další balení na vyžádání.
Skladování	



Příloha č. 24 Technický list plastifikátoru Sika.

Podmínky skladování / Trvanlivost	12 měsíců od data výroby pouze v originálních, neotevřených, nepoškozených obalech. Chraňte před přímým slunečním zářením a mrazem. Kontejnery musí být před dalším plněním důkladně vypláchnuty. Otevřená balení spotřebujte co nejdříve.
Technické údaje	
Chemická báze	Vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů.
Objemová hmotnost	~ 1,06 kg/l (při +20 °C)
Hodnota pH	~ 4,5 ± 0,5
Obsah chloridových iontů	≤ 0,10 %
Obsah alkálií (Na₂O)	≤ 1,0 %
Aplikační podrobnosti	
Dávkování	0,2 – 1,7 % na hmotnost cementu
Důležitá upozornění	Sika® ViscoCrete®-1035 CZ doporučujeme přidávat současně se záměsovou vodou a zamíchat do betonu před přidáním případných dalších přísad. Pro optimální využití značného snížení množství vody doporučujeme minimální dobu míchání 45 vteřin. Jemné dávkování vody doporučujeme spustit po uplynutí 2/3 doby míchání, aby se zamezilo jejimu přebytku v betonu. Při eventuelním dalším dávkování na staveništi doporučujeme použít stejný superplastifikátor jako na betonárně. Při dodatečném dávkování do mixu musí být zajištěno stejnoměrné rozmíchání superplastifikátoru v betonu, proto doporučujeme dobu míchání 1 minutu na každý m ³ betonu, nejméně však 5 minut. Před prvním použitím je třeba provést průkazní zkoušky podle platných norem.
Platnost hodnot	Hodnoty a data uvedená v tomto technickém listu jsou založena na výsledcích laboratorních testů. Tyto hodnoty se mohou při aplikaci v praxi lišit, což je mimo naši kontrolu. Detailní informace o zdravotní závadnosti a bezpečnosti práce jsou spolu s bezpečnostními informacemi (např. fyzikálními, toxikologickými a ekologickými daty) uvedeny v bezpečnostním listu. Aktuální technické a bezpečnostní listy, Prohlášení o shodě, Certifikáty najdete na internetové adrese www.sika.cz .
Bezpečnostní předpisy	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Při zpracování je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny, platné předpisy příslušných úřadů o ochraně zdraví při práci. ▪ Při aplikaci používejte ochranný oděv, brýle a rukavice. ▪ Podrobnější údaje týkající se hygieny a bezpečnosti práce, ochrany životního prostředí jsou uvedeny v Bezpečnostním listu. ▪ Odstraňování odpadu - Odpad dle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech. ▪ Odpad odvézt na skládku stavebního odpadu nebo předejte odborné firmě k likvidaci. Fólie je možné recyklovat.
Místní omezení	V závislosti na specifických místních omezeních se mohou výsledné vlastnosti tohoto výrobku v různých zemích lišit. Vždy se řiďte informacemi uvedenými v platném Technickém listu.

Příloha č. 24 Technický list plastifikátoru Sika.**Právní dodatek**

Uvedené informace, zvláště rady pro zpracování a použití našich výrobků, jsou založeny na našich znalostech z oblasti vývoje chemických produktů a dlouholetých zkušenostech s aplikacemi v praxi při standardních podmínkách a řádném skladování a používání. Vzhledem k rozdílným podmínkám při zpracování a dalším vnějším vlivům, k četnosti výrobků, různému charakteru a úpravě podkladů, nemusí být postup na základě uvedených informací, ani jiných psaných či ústních doporučení, vždy zárukou uspokojivého pracovního výsledku. Veškerá doporučení firmy Sika CZ, s.r.o. jsou nezávazná. Aplikátor musí prokázat, že předal písemně včas a úplně informace, které jsou nezbytné k řádnému a úspěšnému zaručujícímu posouzení firmou Sika. Aplikátor musí přezkoušet výrobky, zda jsou vhodné pro plánovaný účel aplikace. Především musí být zohledněna majetková práva třetí strany. Všechny námi přijaté objednávky podléhají našim aktuálním „Všeobecným obchodním a dodacím podmínkám“. Ujistěte se prosím vždy, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ten je spolu s dalšími informacemi k dispozici na našem technickém oddělení nebo na www.sika.cz.

Construction





Sika CZ, s.r.o.
Bystrcká 1132/36,
CZ 624 00 Brno

tel: +420 546 422 464
fax: +420 546 422 400
e-mail: sika@cz.sika.com
<http://www.sika.cz>



Příloha č. 25 Technický list keramických vláken

		BASALTEX a.s. Uničovská 296/46 787 01 Šumperk Česká republika	
TECHNICKÝ LIST			
Technický list číslo: 004 – 2008			
Název: IZOWAT 12G			
Popis: Granulovaná a krácená vlákna z hlinito-křemičitých vláken.			
<i>Technické parametry:</i>			
1. Max. teplota při používání / °C/:	1260		
2. Průměrná tloušťka vláken / μm /:	5		
3. Chemické složení / % /:	min. 44 Al ₂ O ₃		
	max. 55 SiO ₂		
4. Průměrná délka vlákna /mm/:	5–15		
5. Objemový obsah granulí / % /:	max. 2		
6. Vlhkost při expedici hmotnostní / % /:	max 1		
7. Objemová hmotnost /kg m ⁻³ /:	200		
8. Barva :	Bílá až naředlá		
9. Balení :	Big bag pytle POP 14 kg		
10. Určení:	- izolace ucpávkové - filtrace horkých plynů - izolace plošné - výroba kompozitů - izolace nástřikové - výroba keramických hmot - výroba desek, rohoží, kartónů, plstí apd.		
11. Skladování:	Skladování v suchých skladech, na roli nesmí působit žádný tlak. Teplota skladování je -10 °C až + 50 °C.		
Nahrazuje : -	Účinnost: 1.8. 2008		
Zpracovatel: -	Revize : 9.1. 2009		
Schválil:			
	Ing. Miloslav Hájek Obchodně – výrobní ředitel		
Telefon: +420 583 222 220	IČO: 416 95 721		
Fax : +420 583 222 230	DIČ: CZ416 95 721		
E-mail: info@basaltex.cz			
Firma zapsána OR u Krajský obchodní soud v Ostravě oddíl B, vložka 2769.			

Příloha č. 26 Technický list metakaolinu MEFISTO L05.

MEFISTO L05

Použití: výroba stavebních materiálů

Surovina: jílovec

Chemické a fyzikální vlastnosti:

	Typická hodnota v %	Garantovaná hodnota
Obsah Al ₂ O ₃	40,10	min. 38,0
Obsah SiO ₂	54,10	max. 57,0
Obsah K ₂ O	0,80	max. 0,9
Obsah Fe ₂ O ₃	1,10	max. 1,80
Obsah TiO ₂	1,80	max. 2,00
Obsah MgO	0,18	max. 0,4
Obsah CaO	0,13	max. 0,2
Ztráta žháním %	2,20	0,3 - 4,0
Vlhkost %	0,50	-
Měrný povrh m ² /g	12,69	-
Pucolánová aktivita °C	4,30	min. 4,0
Stupeň bělosti %	60,00	-

Typická křivka rozdělení velikosti částic:

