



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

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

## VLIV KYSELÉHO PROSTŘEDÍ NA ŽÁROBETONY S ROZDÍLNÝM OBSAHEM CEMENTU

EFFECT OF ACIDIC INFLUENCE ON THE REFRACTORY CASTABLE WITH DIFFERENT CEMENT  
CONTENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. DANIEL MÁTL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LENKA NEVŘIVOVÁ, Ph.D.



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Daniel Mátl
<b>Název</b>	Vliv kyselého prostředí na žárobetony s rozdílným obsahem cementu
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2014
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	16. 1. 2015
V Brně dne 31. 3. 2014	

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

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

## Podklady a literatura

1. HANYKÝŘ, V. Kutzendorfer J. 2000. Technologie keramiky. Vega, Praha 2000
2. HERAINOVÁ, M. Žárovzdorné materiály, Silikátový svaz Praha 2003
3. HLAVÁČ, J. Základy technologie silikátů. Praha 1981
4. KUTZENDORFER, J. Žárovzdorné materiály II, VŠCHT Praha 1995
5. ŠAŠEK, L. , BARTUŠKA, M. Laboratorní metody v oboru silikátů, Praha 1981
6. ROUTSCHKA G. WUTHNOW H. Pocket Manual Refractory Materials: Design, Properties and Testing, ISBN 978-3802731587, 2008
7. JERSÁK V. Zkoumání mechanických vlastností žárobetonů s ohledem na jejich použití pro keramické kotevní prvky. Brno, 2007. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
8. TOMŠŮ F., PALČO Š. Žárovzdorné materiály. Vyd. 1. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2009, 110 s. ISBN 978-80-02-02170-4.
9. ČSN EN 1402-1. Žárovzdorné výrobky netvarové: Část 1: Úvodní ustanovení a klasifikace. Plzeň: Český normalizační institut, 2004.
10. LACH, Vladimír. Keramika. 3. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992, 172 s. ISBN 80-214-0332-2.

Platné normy, internetové zdroje, odborné časopisy

## Zásady pro vypracování

Komíny, odtahy spalin, části chemických zařízení, spalovny odpadů a další zařízení, ve kterých je používána žárobetonová vyzdívka, vyžadují určitou míru odolnosti vůči kyselinám. Jedná se o místa, kde na vyzdívku působí kyselé páry a kondenzáty, obvykle obsahující SO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, dále kyseliny HCl, HF, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ap.

Úkolem práce je v úvodu popsat a podle různých kritérií rozdělit žárobetony používané ve výše uvedených aplikacích, charakterizovat kyselinovzdorný žárobeton a definovat zkušební postupy, které je možné pro stanovení kyselinovzdornosti použít.

Praktická část diplomové práce bude navazovat na výsledky experimentů provedených v rámci práce bakalářské, kdy byla stanovována odolnost různých typů ostřiv používaných v žárobetonech odolných vůči kyselinám. Úkolem diplomanta je navrhnout minimálně čtyři receptury na přípravu DC, MC, LC žárobetonů s využitím již testovaných ostřiv. Budou připravena zkušební tělesa, na kterých budou provedeny základní fyzikálně mechanické zkoušky, a bude testován vliv teploty výpalu na základní užité charakteristiky žárobetonu. U všech navržených receptur bude testována odolnost vůči kyselině sírové a bude sledován vliv kyseliny na povrchovou vrstvu žárobetonu pomocí konfokální mikroskopie.

Rozsah práce 70-80 stran.

## Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....  
Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Jsou aplikace žárobetonů pro místa, kde na ně působí korozivní prostředí. Diplomová práce se zabývá popisem korozních vlivů a metodikou jejich zkoušení. Jednou z nejdůležitějších vlastností materiálů, která ovlivňuje jejich chemickou korozní odolnost, je jejich hutnost. Praktická část práce je zaměřena na zkoušení různých druhů žárobetonů v současnosti používaných v praxi. Na těchto žárobetonech byla stanovena odolnost proti kyselině sírové.

## **Abstract**

There are applications of refractory concretes for places where these are exposed to corrosive environments. This diploma thesis deals with both description the corrosive effects and methodology of their testing. One of the most important properties of materials, affecting the chemical corrosion resistance, is their density. The practical part of the thesis is focused on testing the refractory concretes which are currently used for applications. The aggregates were tested for the resistance to sulfuric acid.

## **Klíčová slova**

Žárobeton, korozní prostředí, chemická odolnost, hydraulická vazba, chemická vazba, hutnost,

## **Keywords**

Refractory concrete, corrosive environments, chemical resistance, hydraulic bond, chemical bond, density,

### **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Daniel Mátl *Vliv kyselého prostředí na žárobetony s rozdílným obsahem cementu*. Brno, 2015. 88 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16.1.2015

.....

podpis autora

Děkuji Ing. Lence Nevřivové, Ph.D. za vedení při práci, názory a odborné rady, které mi během zpracování diplomové práce poskytla. Dále Mgr. Martinu Vyšvařilovi, Ph.D. a Mgr. Ivo Kusákovi, Ph.D. za poskytnutí technického zázemí během experimentu.

## OBSAH

ÚVOD.....	10
I. TEORETICKÁ ČÁST .....	11
1 NETVAROVÉ ŽÁROVZDORNÉ MATERIÁLY .....	11
2 ŽÁROBETONY .....	12
2.1 DRUHY VAZEB .....	13
2.1.1 Keramická vazba .....	14
2.1.2 Hydraulická vazba .....	14
2.1.3 Anorganicko - chemická vazba .....	15
2.1.4 Organicko - chemická vazba .....	15
2.2 TYPY ŽÁROBETONŮ .....	16
2.2.1 Hutné žárobetony - DC.....	17
2.2.2 Izolační žárobetony - IC .....	17
2.2.3 Žárobetony s chemickou vazbou - CBC .....	17
2.2.4 Žárobetony s hydraulickou vazbou - HBC .....	18
2.2.5 Žárobetony běžné - RCC .....	18
2.2.6 Žárobetony ztekucené - DCC .....	19
2.2.7 Žárobetony se středním obsahem cementu - MCC.....	19
2.2.8 Žárobetony s nízkým obsahem cementu - LCC.....	19
2.2.9 Žárobetony s velmi nízkým obsahem cementu - ULCC.....	20
2.2.10 Žárobetony bezcementové - NCC .....	20
2.3 SLOŽENÍ ŽÁROBETONOVÝCH SMĚSÍ .....	22
2.3.1 Kamenivo .....	22
2.3.2 Pojivo.....	24
2.4 MIKROPLNIVA .....	27
2.4.1 Mikrosilika .....	28
2.4.2 Reaktivní oxidy hlinité .....	28
2.5 PŘÍSADY .....	29
2.5.1 Zpomalovače tuhnutí .....	29
2.5.2 Urychlovače tuhnutí .....	30
2.6 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI ŽÁROBETONŮ.....	31
2.6.1 Hutnost .....	31
2.6.2 Odolnost proti náhlým změnám teplot.....	34
3 KOROZE ŽÁROVZDORNÝCH MATERIÁLŮ .....	36
3.1 MECHANICKÉ VLIVY .....	36
3.1.1 Adhezivní působení .....	37
3.1.2 Abrazivní působení.....	38



3.1.3	Erozivní působení .....	38
3.1.4	Únavové působení .....	39
3.1.5	Vibrační působení.....	39
3.2	CHEMICKÉ PŮSOBENÍ .....	40
3.2.1	Hydratace.....	40
3.2.2	Reakce s roztoky kyselin a zásad.....	41
3.2.3	Chemická koroze taveninou .....	43
4	ZKOUŠKY ODOLNOSTI PROTI KOROZI .....	44
4.1	STATICKÉ METODY .....	44
4.1.1	Ponořovací metody .....	44
4.1.2	Kelímková metoda.....	45
4.1.3	Modelová pec .....	46
4.2	DYNAMICKÉ METODY .....	47
4.2.1	Ponořovací metody .....	47
4.2.2	Kelímková metoda.....	47
4.2.3	Modelová pec .....	47
4.3	ZKOUŠKY PRO STANOVENÍ KYSELINOVZDORNOSTI.....	48
4.3.1	Výrobky tvarové hutné .....	48
4.3.2	Komínové vložky .....	48
4.3.3	Křemičité sklo .....	48
4.3.4	Užitkový porcelán .....	49
II.	PRAKTICKÁ ČÁST .....	50
1	METODIKA ŘEŠENÍ PROVÁDĚNÝCH PRACÍ .....	50
2	POSUZOVANÉ ŽÁROBETONY .....	51
2.1	POUŽITÉ SUROVINY .....	51
2.1.1	Plnivo.....	51
2.1.2	Pojivo.....	52
2.1.3	Přísady .....	53
2.2	SLOŽENÍ NAVRŽENÝCH ŽÁROBETONOVÝCH SMĚSÍ.....	53
2.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	55
2.4	CHEMICKÉ SLOŽENÍ .....	57
3	LABORATORNÍ ZKOUŠKY .....	58
3.1	STANOVENÍ KONZISTENCE .....	58
3.2	STANOVENÍ TRVALÝCH DÉLKOVÝCH ZMĚN .....	60
3.3	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI A ZDÁNLIVÉ PÓROVITOSTI.....	60
3.4	STANOVENÍ NASÁKAVOSTI A ZDÁNLIVÉ HUSTOTY .....	61
3.5	STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU ZA STUDENA .....	62

3.6	STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU ZA OHYBU ZA STUDENA .....	62
3.7	STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI KYSELINĚ SÍROVÉ .....	62
3.8	KONFOKÁLNÍ MIKROSKOPIE .....	63
3.8.1	Tvar povrchu .....	64
3.8.2	Střední aritmetická výška drsnosti .....	65
3.8.3	Střední kvadratická výška drsnosti .....	65
3.8.4	Aritmetická střední výška zakřivené plochy profilu .....	66
3.8.5	Stanovení tvaru povrchu .....	66
4	VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK .....	67
4.1	KONZISTENCE .....	67
4.2	TRVALÉ DÉLKOVÉ ZMĚNY .....	67
4.3	KRITERIA HUTNOSTI .....	68
4.4	PEVNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY .....	69
4.5	KYSELINOVZDORNOST .....	70
4.6	KONFOKÁLNÍ MIKROSKOPIE .....	71
5	DISKUSE VÝSLEDKŮ .....	74
6	ZÁVĚR .....	84
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ .....	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....	87

## ÚVOD

Žárovzdorný výrobek se podle mezinárodní normy (ISO Refractories – Vocabulary 1998) definuje jako nekovový materiál nebo výrobek, kterého fyzikálně-chemické vlastnosti umožňují jeho použití ve vysokých teplotách. Předpokladem splnění tohoto základního požadavku je vysoký bod tavení a termodynamická stálost za velmi vysokých teplot (obvykle nad 1000°C). Tyto materiály jsou nepostradatelné v odvětvích, jako je hutnictví, výroba cementu, skla a keramiky. Nevyhnete se však ani jejich použití i v oblastech středních teplot, jsou-li požadované jiné specifické vlastnosti, například chemická odolnost.

Nynějším trendem je nahrazování tvarových žárovzdorných výrobků netvarovými. Jejich výhodou je především odstranění nutnosti výpalu před vlastní aplikací. K výpalu dochází až při samotném uvedení tepelného agregátu do provozu, což je energeticky úsporné. Výhodou je taktéž bezspárá instalace, kdy ve vyzdívce nejsou slabší místa. Při aplikaci také s výhodou užíváme libovolné tvarovatelnosti. Je ovšem nutné dodržet technologický postup při uvádění agregátu do provozu, protože k získání požadovaných vlastností dochází k mnohým chemickým a mineralogickým změnám.

Důležitou oblastí netvarových žárovzdorných materiálů jsou žárobetony. Neustálým rozšiřováním sortimentu žárobetonů o nové typy jsou požadovány stále vyšší technické nároky nejen na jejich skladbu, na technologii vytváření monolitických vyzdívek z nich, ale i na jejich uvádění do provozu. Technologický vývoj je v současnosti orientován na odstranění nedostatků tradičních žárobetonů. Proto byly vyvinuty nové druhy s nízkým obsahem cementu (LCC, ULCC), a bezcementové žárobetony (NCC) zpracované na žáromonolity pomocí vibrace nebo litím, tedy samotekoucí žárobetony (SFC).

Jelikož z praxe vyplývají požadavky i pro vyzdívkou agregátů, kde je kromě teploty, materiál namáhán mechanickou a chemickou korozí. Je tedy potřeba nalézt vhodné řešení a to jak vzhledem ke složení, tak i k ekonomičnosti těchto aplikací.

# I. Teoretická část

## 1 Netvarové žárovzdorné materiály

Netvarové žárovzdorné materiály se skládají ze žárovzdorných surovin - kameniva, o dané zrnitosti, a pojiva. Dodávají se v sypkém stavu a zpracovávají na místě jako vyzdívka agregátu, která se následně vysuší a vypálí.

Z těchto směsí je možné vyrobit výrobky hutné, s pórovitostí pod 45 %, nebo izolační s pórovitostí nad 45 %. [1]

Netvarové žárovzdorné materiály často nahrazují tradiční vyzdívky z tvarových materiálů. Výhodou jejich použití je rychlost a metoda zhotovení monolitické vyzdívky beze spár s dobrou odolností proti náhlým změnám teplot a se zvýšenou tepelně-izolační schopností, oproti vyzdívkám z tvarových materiálů.

Vzhledem k chemickému složení a možným nárokům na použití u netvarových žárovzdorných materiálů platí stejná pravidla jako u tvarových.

Podle zpracování se rozlišují následující tři třídy netvarových žárovzdorných materiálů:

- směsí pro výrobu monolitických konstrukcí a pro opravy,
- materiály pro pokládání a ke spárování,
- materiály nástřikové a pro povrchovou ochranu.

Výhody netvarových materiálů pro výrobu monolitických konstrukcí oproti tvarovým žárovzdorným materiálům:

- krátká výrobní doba,
- rychlejší instalace,
- lepší odolnost proti náhlým změnám teplot.

Nevýhody:

Důležité výrobní postupy, jako je sušení a výpal netvarových žárovzdorných materiálů, neprovádí přímo výrobce, proto kvůli chybným technologickým postupům může docházet ke znehodnocení materiálu. Spotřebitel se proto musí držet aplikačních postupů udaných výrobcem. [2]

## 2 Žárovbetony

Netvarované výrobky a vylisky jako polotovary nabývají konečnou podobu a vlastnosti pomocí vazby, která se vytváří:

- keramicky - slinováním v přítomnosti nebo bez přítomnosti kapalné fáze během výpalu,
- chemicky - reakcí substance při zvýšené teplotě žárovzdorného materiálu s anorganickým nebo organickým pojivem,
- hydraulicky - pomocí hydraulicky tuhoucích a tvrdnoucích pojiv cementovou vazbou (obvyklé cementy), nebo se zvýšeným obsahem  $Al_2O_3$  – hlinitanové cementy.

Žárovbetony lze rozdělit podle těchto kritérií:

Podle způsobu aplikace:

- žárovbetony – běžné, ztekucené, s různým obsahem cementu,
- žárovzdorné torkretovací materiály – hutné, izolační, plastické,
- žárovzdorné tvarovatelné směsi – dusací směsi, plastické materiály,
- žárovzdorné malty – tuhnoucí výpalem, pouze na vzduchu,
- jiné netvarové žárovzdorné výrobky – suché, vstříkovací, ucpávkové směsi, nátěry.[4]

Podle klasifikační teploty:

- tepelně odolný žárobeton - použití  $< 700^\circ C$ ,
- žároodolný žárobeton - použití  $700^\circ C - 1100^\circ C$ ,
- žárovzdorný žárobeton - použití  $1100^\circ C - 1500^\circ C$ ,
- vysoce žárovzdorný beton - teploty použití  $> 1500^\circ C$ .

Podle chemického složení a základních surovin:

- hlinitokřemičité výrobky – na základě hlinitokřemičitých kameniv, přírodních a syntetických vysocehlinitých surovin až po různé druhy korundu,
- bazické výrobky – založeny na obsahu slinuté, nebo tavené magnezie, slinutou dolomii, spinely nebo chromovou rudu,
- speciální výrobky – obsahují další oxidová i neoxidová ostřiva, nejčastěji karbid křemíku, dále křemičitan a oxid zirkoničitý,
- výrobky obsahující uhlík – tedy výrobky z předcházejících kategorií obsahující nejméně 1% uhlíku (vnášen v pevné formě nebo jako kapalina). [3]

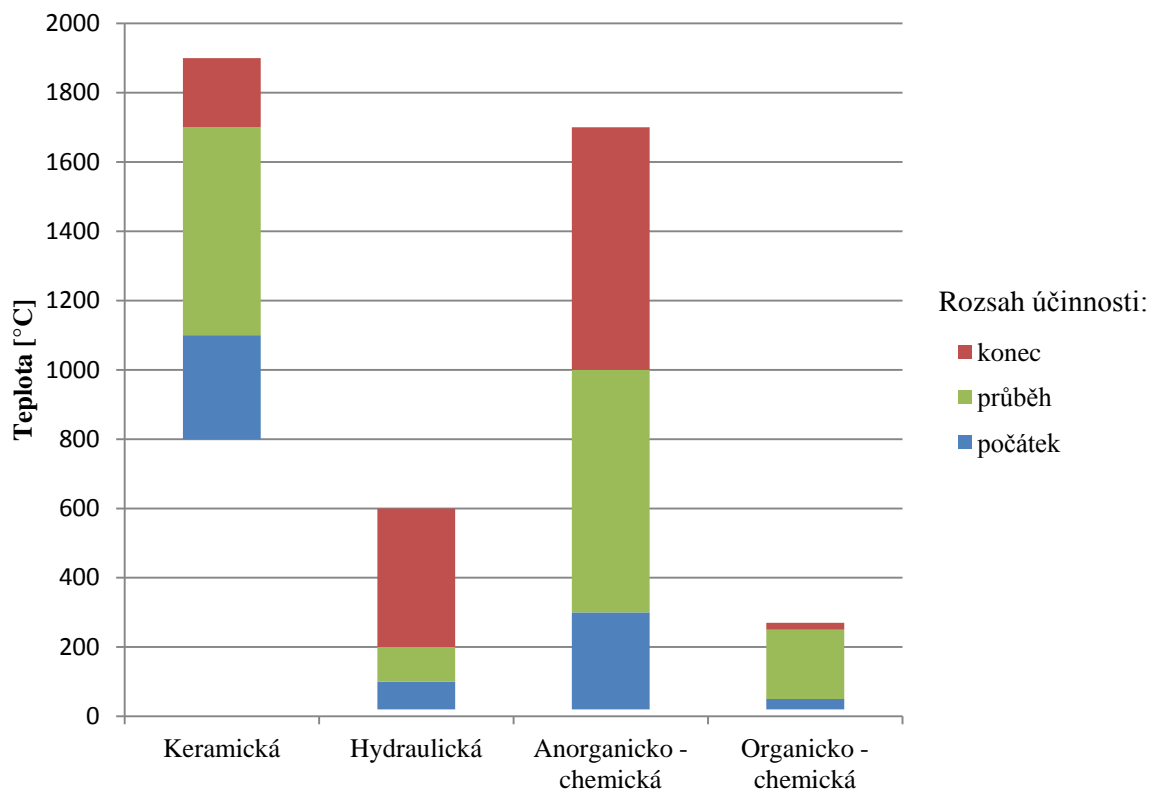
## 2.1 Druhy vazeb

Nejdůležitější druhy vazeb netvarových žárovzdorných materiálů jsou:

- keramická vazba,
- hydraulická vazba,
- anorganicko - chemická vazba,
- organicko - chemická vazba.

Typ vazby	Teplotní rozsah účinnosti[°C]	
	Počátek	Konec
Keramická	800 - 1100	1700 - 1900
Hydraulická	20 - 100	200 - 600
Anorganicko - chemická	20 - 300	1000 - 1400
Organicko - chemická	20 - 50	< 250

Tabulka 1. Teplotní rozsah působení jednotlivých druhů vazby [1,2,3]



Obr. 1 Teplotní účinnost typu vazby

### 2.1.1 Keramická vazba

V praxi se používají žárobetony, jejichž ovlivňující vlastnosti bývají dosaženy po prvním výpalu. Vazby, které vzniknou za nižších teplot, jsou působením teploty přeměňovány na keramickou vazbu, kdy vysokoteplotní reakce probíhají jak v pojivu, tak mezi pojivem a kamenivem.

Hlavní reakce vedoucí ke vzniku keramické vazby jsou dehydratace hydraulické vazby, případně termická přeměna chemické vazby a reakce mezi pojivem a kamenivem. Ke slinování dochází při teplotě cca 1100°C, kterou je možno snížit obsahem nečistot nebo přísad napomáhajících slinování, což se může nevýhodně odrazit na únosnosti materiálu v žáru. Čím nižší je teplota slinování žárovzdorné hmoty, tím nižší je i maximální teplota použití a opačně. Zrna o větší velikosti reagují pouze na povrchu, proto je prvkem těchto reakcí především jemné mikroplnivo. Jemnost a reaktivita mikroplniva musí být nastavena tak, aby již za nízkých teplot reagovalo s pojivem bez výskytu kapalné fáze - taveniny. Dále nesmí negativně ovlivňovat termickou stabilitu celého systému s ohledem na tvorbu keramické vazby. Mikroplnivo má zásadní vliv na velikost smršťování či roztažnost, a tím i na tvorbu trhlin v keramické vazbě. [2]

### 2.1.2 Hydraulická vazba

Hydraulickou vazbou se vyznačují cementy, které tuhnou a následně získávají požadované vlastnosti za normální teploty. V žárovzdorném průmyslu používáme pouze hlinitanový cement se souvisejícími modifikacemi. Portlandský cement a jeho modifikace se již příliš nepoužívají, a to zejména kvůli těmto technologickým vlastnostem:

- Snížení tepelné odolnosti těchto žárobetonů, z důvodu obsahu značného množství CaO, které se v soustavách s SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a dalších chová jako tavící oxid. Snadno s nimi reaguje za vzniku vápenatých hlinitokřemičitanů (galenitu a anortitu) s nízkou teplotou tavení, nebo přímo s dalšími kyslíčnými vytváří taveniny, které se ve směsi objevují již při 1000°C.
- Pokles pevnosti, kdy se v průběhu zahřívání postupně ztrácí voda vázaná v křemičtanech a hlinitanech vápenatých. Při 550 °C odchází voda vázaná v Ca(OH)<sub>2</sub> a vzniká volné CaO (jeho menší část volného vzniká i z hydrosilikátů). V případě odstávky, nebo při jiném ochlazení agregátu volný CaO zreaguje zpět s vodou na Ca(OH)<sub>2</sub>, což provází značné zvětšení objemu (80-150%). Vzniklé krystalizační tlaky beton zcela rozruší.

V prvním případě nám chemická povaha složení neumožňuje zvýšit teplotní odolnost. V druhém případě lze pokles pevnosti ovlivnit stabilizací přídavkem jemně mletých látek, které lze ve směsi stejnoměrně rozptýlit jako cement, a které snadno vytvářejí sloučeniny vůči vlhkosti stabilní.

Hlinitanové žárobetony obsahují jako hydraulickou složku hlinitanový cement, jehož hlavními minerálními složkami jsou  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ , z nichž po rozdělení s vodou vznikají kalciumalumináty jako  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  a také hydrát hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Výhody u těchto cementů je díky  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vysoká žárovzdornost, po výpalu nevzniká volné  $\text{CaO}$  – není zapotřebí jej vázat. [5]

### **2.1.3 Anorganicko - chemická vazba**

Anorganická vazba je tvořena anorganickými sloučeninami, které materiál zpevňují v rozpětí od pokojových teplot do teplot kolem  $300^\circ\text{C}$ . Přitom probíhají podle druhu vazby rozličné chemické reakce. Nejčastěji to jsou fosforečné vazby, tvořené fosforečnany různých prvků. Nejlépe se osvědčily fosforečnany hlinité, které postupně přecházejí až na  $\text{AlPO}_4$ .

Časté jsou též vazby na bázi rozpustných křemičitanů alkalických kovů (vodní sklo). Působením kyselých reagujících látek, např.  $\text{CO}_2$  ve vzduchu, z nich vzniká reaktivní kyselina křemičitá a její polykondenzáty, které fungují jako tvrdící činidlo. Tvrdnutí je stimulováno zvýšeným obsahem  $\text{CO}_2$ , ale taktéž přídavkem fluorokřemičitanů, sulfidů apod. Alkálie však snižují žárovou odolnost.[2]

### **2.1.4 Organicko - chemická vazba**

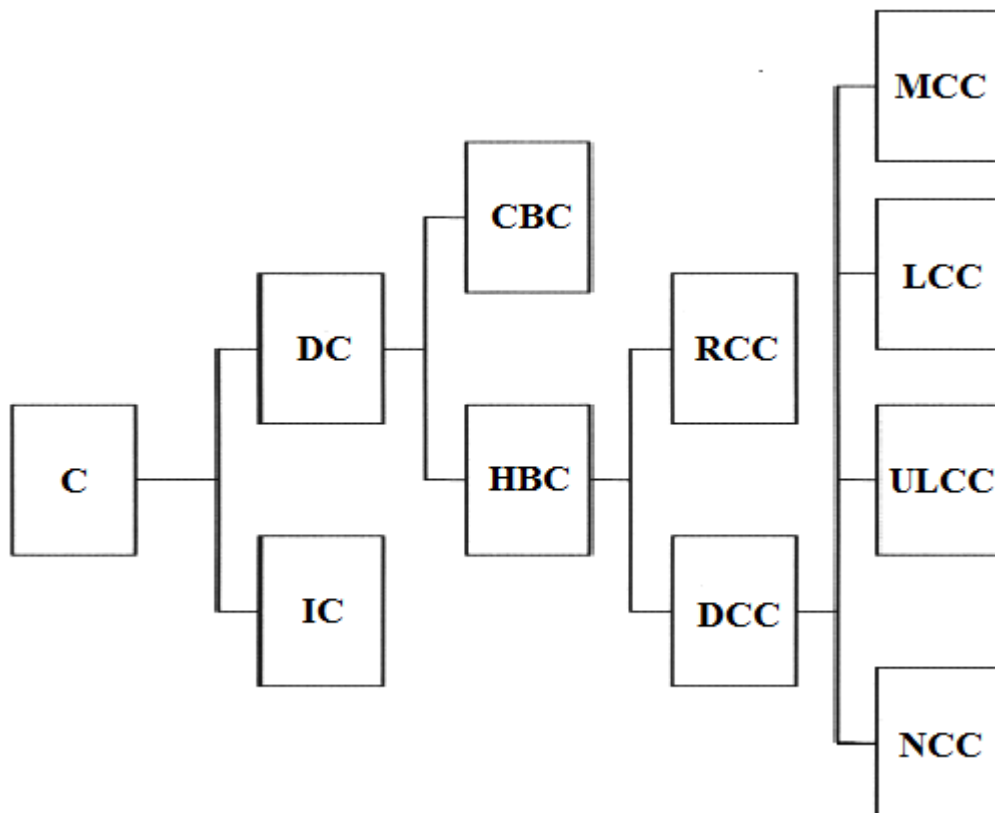
Organická vazba je tvořena organickými látkami, jako jsou deriváty celulosy, sulfitový louh apod. Při ohřátí do teploty cca  $250^\circ\text{C}$  dochází k porušení vazby, čímž dochází k podstatnému poklesu pevnosti. Proto se často receptury skládají s anorganickou vazbou, aby nevzniklo značné teplotní rozmezí o nízké pevnosti před vznikem keramické vazby.

V závislosti na způsobu instalace lze použít kromě tekutých živců i různé jiné kombinace organických pojiv, například novolaku nebo pevné smoly. Jde většinou o hmoty na vodní bázi, které obsahují uhlík – ty vytváří vazbu až při vyšších teplotách. S výhodou je lze užít na opravu vyzdívek obsahujících uhlík, protože k nim mají dobrou přilnavost.[3]



## 2.2 Typy žárobetonů

- C - Žárobeton (*castable*),
- DC - Žárobeton hutný (*dense castable*),
- IC - Žárobeton izolační (*insulating castable*),
- CBC - Žárobeton s chemickou vazbou (*chemically bonded castable*),
- HBC - Žárobeton s hydraulickou vazbou (*hydraulically bonded castable*),
- RCC - Žárobeton běžné (*regular castable*),
- DCC - Žárobeton ztekucený (*deflocculated castable*),
- MCC - Žárobeton se středním obsahem cementu (*medium cement castable*),
- LCC - Žárobeton s nízkým obsahem cementu (*low cement castable*),
- ULCC - Žárobeton s velmi nízkým obsahem cementu (*ultra low cement castable*),
- NCC - Žárobeton bezcementový (*no cement castable*). [2]



Obr. 2 Označení typu žárobetonů

### 2.2.1 Hutné žárobetony - DC

Hutné žárobetony mohou mít různý typ vazby: chemickou, hydraulickou vazbou. Pro tyto žárobetony postačuje přírodní kamenivo (čedič, diabas, andezit), protože při středních teplotách dochází k poklesům pevností, kvůli hydraulické vazbě. Pro žárobetony vystavené teplotám nad 700°C se používá umělé kamenivo (drcený šamot, korund, bauxit, chromit).

Objemová hmotnost hutných žárobetonů je vyšší než 1800 kg.m<sup>-3</sup>.

### 2.2.2 Izolační žárobetony - IC

Pro přípravu lehčených monolitů a pro výrobu tvarových pálených materiálů se používají lehčená kameniva, především expandovaný perlit, drť z lehčeného šamotu, duté kuličky na bázi systému SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dutý kuličkový korund apod. Jako pojivo se používá nejčastěji hydraulická vazba, především cementy, dále pak pojiva fosforečná, vodní sklo a křemičitá. Jako zástupce cementů se velmi osvědčily cementy hlinitanové s obsahem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do 40 %, pro vyšší teploty vysocehlinitanové s obsahem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nad 40 %. Pro nižší teploty použití vyhovuje portlandský cement.

Pro použití do nízkých teplot je vhodný perlitový beton o objemové hmotnosti 400 - 800 kg.m<sup>-3</sup>, pevnosti 1 - 4,5 MPa a měrné tepelné vodivosti 0,10 - 0,19 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Používá se do teploty 800°C.

Pro vyšší teploty se používá jako plnivo drť z lehčeného šamotu. Pro ještě náročnější podmínky se osvědčil kuličkový korund a kvalitní vysocehlinitanový cement. Objemová hmotnost izolačních materiálů zpravidla nepřesahuje 1800 kg.m<sup>-3</sup>. [2]

### 2.2.3 Žárobetony s chemickou vazbou - CBC

Podle druhu vazby se žárobetony s chemickou vazbou dělí na:

- Žárobetony s bezcementovou anorganickou vazbou. Obsah CaO ≤ 0,2 %. Možné vazby: s vodním sklem, fosfátová, sol-gel,
- Žárobetony s organicko - chemickou vazbou. Pojivem jsou organicko - křemičité sloučeniny, umělé pryskyřice, smoly,
- Žárobetony s bezcementovou vazbou. Založeny na hydrotermální vazbě (C-S-H).

## 2.2.4 Žárobetony s hydraulickou vazbou - HBC

Hydraulická vazba v žárobetonech je tvořena hlinitanovými cementy a dnes už méně používanými portlandskými cementy.

Tyto žárobetony se dělí na běžné a ztekucené, které se dále dělí na žárobetony se středním, nízkým, velmi nízkým a žádným obsahem cementu.

## 2.2.5 Žárobetony běžné - RCC

Běžné žárobetony obsahují obvykle 15 - 30 hm. % a s obsahem 8 - 20 hm. % záměsové vody a jednoduchou aplikací většinou s vibrací cementu. Vyznačují se tak jednoduchou přípravou žárobetonové směsi

Pórovitost běžných žárobetonů velmi snižuje pevnosti a na jejich přípravu je vysoká spotřeba vody. Za nízkou pórovitost a propustnost žárobetonů při teplotách nepřesahujících 21°C může hlinitanový gel vzniklý v průběhu ošetřování. Otevřená pórovitost běžných žárobetonů vysušených při 110°C bývá až 17 %. [3][1]

Určitý podíl této pórovitosti je sice způsoben zadrženými vzduchovými bublinami, ale převládající podíl je vyvolán záměsovou vodou. Při zahřívání v průběhu přeměny se hydraulické pojivo nejprve modifikuje a následně se ztrácí dehydratačním procesem. V průběhu této modifikace struktury se mění distribuce velikostí pórů, pórovitost pak významně roste. Pórovitost vypálených materiálů potom dosahuje velmi vysokých hodnot - až 23 %.

Další z nevýhod běžných žárobetonů je pokles v pevnosti v přechodové oblasti, kdy již neexistuje hydraulická vazba, ale stále ještě pomalé slinování neumožňuje vývin keramické vazby. Není naprosto známo přesné teplotní rozmezí pro určení oblasti s výrazným poklesem pevnosti, skutečnost závisí na různých faktorech, jako jsou typ a poměr hydrátů, teplota ošetřování a časový průběh zahřívání.

Jednou z nevýhod je vysoký obsah vápníku v tomto druhu žárobetonu, protože vápník podporuje vznik tekutých skelných fází při vysokých teplotách prostřednictvím eutektické kapaliny v ternárním systému  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , a který zůstává amorfní ve formě skla, což ovlivňuje odolnost proti korozi nebo žárovzdornost. Obsah nečistot v pojivu pak udává objem nízkotavitelných fází, které se dají odstranit snížením obsahu cementu v žárobetonové směsi.

### **2.2.6 Žárové betony ztekucené - DCC**

Ztekucené betony představují snadnější instalaci díky tekutosti způsobené přidáním dispergačních, také deflokulačních, činidel. Tím dojde k pozitivnímu vlivu na vlastnosti žáromonolitu.

Tyto betony lze dále dělit na žárové betony se středním, nízkým, velmi nízkým obsahem cementu a na bezcementové žárové betony.

### **2.2.7 Žárové betony se středním obsahem cementu - MCC**

Obsahují > 2,5 % CaO, což znamená, že obsah cementu u těchto žárových betonů je 6 - 15 %.

Přidání ztekucovadel do žárových betonů se středním obsahem cementu umožní snížit množství záměsové vody a tím zvýšit hutnost a mechanické vlastnosti žárového materiálu, neboť množství záměsové vody negativně ovlivňuje množství pórů. Díky tomu jsou zlepšeny také další užité parametry - vyšší mechanická pevnost, rozměrová stabilita, dobrá odolnost vůči korozi a abrazi. To předurčuje tyto materiály pro náročnější provozní podmínky. Zpracovávají se nejčastěji vibrolitím.

### **2.2.8 Žárové betony s nízkým obsahem cementu - LCC**

Cementy zhoršují žárové vlastnosti žárových materiálů a tím snižují teplotu jejich použití, jelikož se tvoří tavenina již při nízkých teplotách. CaO obsažený v cementu reaguje při vyšších teplotách s  $\text{SiO}_2$  a s  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v kamenivě, čímž vzniká kapalná fáze se složením podobným anortitu ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$ ) a gehlenitu ( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) s nízkými teplotami tání. Z tohoto důvodu LCC systémy obsahují pouze 1,0 - 2,5% CaO, tedy 3 - 8 % cementu.

Vysoký obsah cementu v běžných žárových betonech snižuje řadu vlastností např. strukturu pojiva v přechodové oblasti a tím způsobuje pokles pevnosti, zvyšuje se pórovitost a klesá odolnost proti náhlým změnám teplot a odolnost proti otěru. Rozvojem LCC systémů byly tyto nedostatky částečně překonány. Jsou zde však nutné podíly superjemných oxidických (korund - 85 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) a křemičitých prášků (převážně  $\text{SiO}_2$  jako mikroplnivo < 4  $\mu\text{m}$ ), které zajišťují tixotropní chování, ale i zvláštní opatření týkající se přípravy a zpracování směsí (například přidávek dispergačního činidla).

Druh použitého cementu významně ovlivňuje vlastnosti nízkocementových žárových betonů. [2]

Žárověbetony LCC a ULCC jsou zpracovatelné na monolit pouze vibrací vzhledem k tixotropnímu chování směsí s velmi nízkou vlhkostí. Zvýšením vlhkosti se zvýší litelnost směsi, ale zároveň se sníží pevnost monolitu. Pro složitější tvary, které jsou špatně vibrovatelné, byly vyvinuty tzv. samotekoucí žárověbetony (SFC - Self Flowing Castable). SFC mají zásadní změny v křivce zrnitosti, obsahují mikropřířady a speciální deflokulační činidlo. Přídavek vody je obvykle pouze 4,5 – 7,5 %. Dosahované pevnosti jsou srovnatelné s LCC. Během tuhnutí a tvrdnutí hlinitanových cementů dochází k fázovým změnám v závislosti na čase a teplotě. [6]

### **2.2.9 Žárověbetony s velmi nízkým obsahem cementu - ULCC**

Obsah cementu u těchto žárověbetonů nepřekračuje 3 %, obsah CaO se pohybuje v rozmezí 0,2-1,0 %. Vlastnosti jsou velmi podobné žárověbetonům s nízkým obsahem cementu. Umožňuje použití velmi malého množství záměsové vody, při zachování důležitých vlastností.

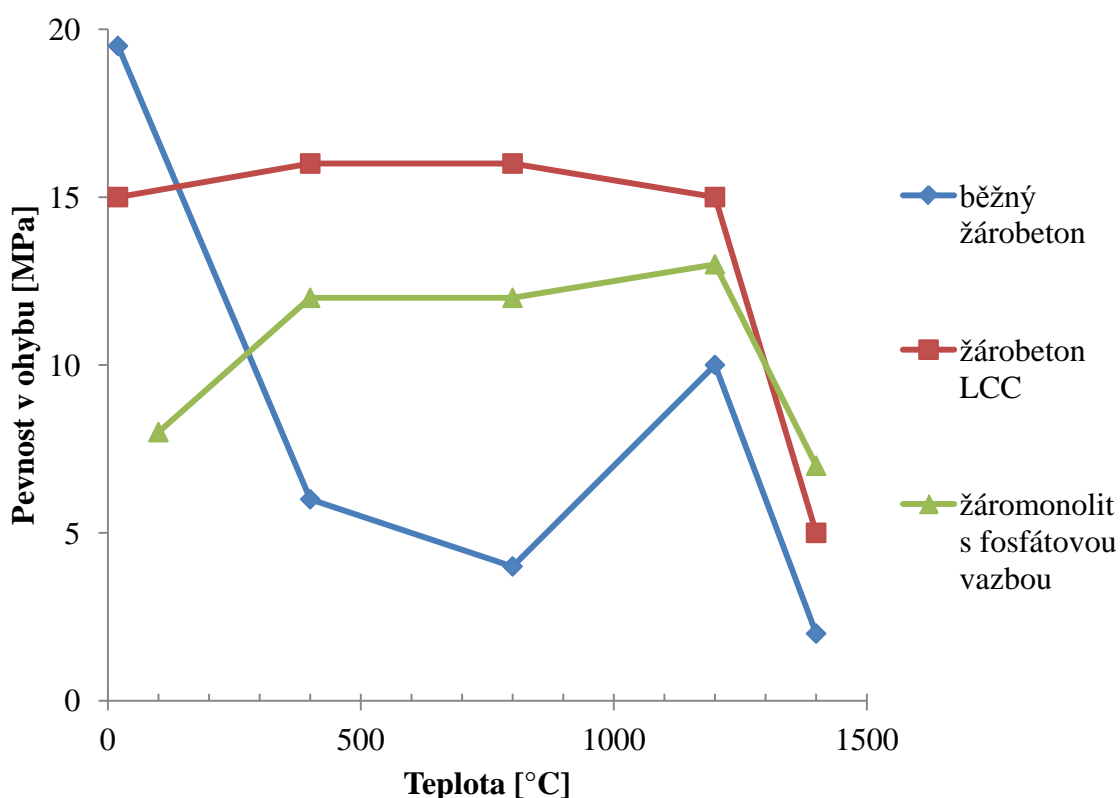
### **2.2.10 Žárověbetony bezcementové - NCC**

Tyto druhy žárověbetonů se vyznačují zpracovatelností při nízké vlhkosti cca 5%. Obsahují  $\leq 0,2\%$  CaO. Přídavkem vhodných disperzních látek podporujících ztekucení a přídavkem mikropřířad (amorfního  $\text{SiO}_2$ , hydratizované oxidy hlinité) dosáhneme tixotropního chování žárověbetonu. Nejvíce jej ovlivňuje jemná frakce, tvořící 25 – 35 % z celkového složení žárověbetonu o velikosti zrn  $< 45 \mu\text{m}$  (matrix). Tento matrix ovlivňuje ve výsledném žárověbetonu především hustotu uložení částic, množství záměsové vody, pevnost za syrova a dále dobu tuhnutí.

Například dávkováním hydratizovaného oxidu hlinitého v rozmezí od 3 do 7 %, mohou monolity nabývat po vysušení pevností i nad 50 MPa. Z technologického hlediska je důležité dodržení teploty zpracování žárověbetonu v rozsahu teplot od 18 do 38 °C. Matrixem obsahujícím mikropřířady namísto hlinitanového cementu lze zabezpečit zvýšenou odolnost proti struskám, vyšší lomovou houževnatost, zbytkovou pevnost za vysokých teplot po namáhání teplotními změnami a vyšší odolnost proti otěru. Nízký obsah vody spolu s těmito opatřeními v oblasti zrnitosti, zaměřenými na maximálně zaplnění prostoru, umožňuje získat žáromonolity s pórovitostí po tepelném zpracování pod 14%. Bezcementové žárověbetony obsahují namísto cementů látky vytvářející chemickou vazbu, hlavně tzv. anorganické

polymery přičemž způsob zpracování zůstává stejný jako při žárobetonech obsahujících cement.

Hydraulické a chemické vazby u některých typů žáromonolitů kombinují. Spolu s materiálovým vývojem nových žáromonolitů probíhá vývoj techniky instalace, protože tradiční způsoby, tj. lití, dusání, torkretování apod. nejsou pro nové směsi vyhovující. Podmínkou dokonalé přípravy tixotropních směsí je intenzivní míchání s přesně určeným množstvím vody. Instalují se výhradně s použitím vibrace, s výhodou při vysokých frekvencích, pozitivně ovlivňujících ztuhnutí. Nevýhodou uhlíku je jeho nedostatečná odolnost proti působení kyslíku - začíná oxidovat již od teploty 400 °C.[2][7]



Obr. 3 Závislost pevnosti v ohybu různých druhů žáruvzdorných monolitů na teplot [1]

## 2.3 Složení žárobetonových směsí

Suché žárobetonové směsi na výrobu žáromonolitů nebo prefabrikátů obsahují tyto základní složky:

- Kamenivo (ostřivo), tj. zrnitý materiál, používaný v několika frakcích,
- hydraulické pojivo nebo chemické pojivo.

Kromě uvedených složek mohou směsi obsahovat náhodně rozptýlená anorganická kovová (ocelová) vlákna nebo keramická vlákna za účelem zvýšení tahové pevnosti a tím odolnosti proti náhlým změnám teplot žáromonolitů, případně organická vlákna za účelem snížení citlivosti žárobetonů k sušení. Speciální druhy přísad: mikropřísady, ztekucovadla, regulátory tuhnutí.

### 2.3.1 Kamenivo

Protože žárobetony mají odolávat velmi náročnému tepelnému, chemickému a mechanickému namáhání, lze použít jen velmi čisté suroviny s velmi nízkým obsahem průvodních oxidů. Tím se velmi omezuje použití přírodních neupravených surovin.

Převážná většina žárobetonů je založena na bázi hlinitokřemičitých a vysocehlinitých ostřiv. Hlinitokřemičitá obsahují jako základní složky  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$  v různém poměru (viz Obr. 4) Kromě těchto dvou oxidů obsahují také nepatrné množství degradujících oxidů, které snižují žárové vlastnosti plniva i jeho kvalitu tím, že se základními složkami tvoří nízkotavitelná eutektika. Jsou to oxidy  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{Na}_2\text{O}$ . [2]

Pro tepelně izolační žárobetony se požadují kameniva s dobrou tepelně izolační schopností (vysoká pórovitost, nízká objemová hmotnost) a také rozměrová stálost až do předpokládané teploty použití.

Používají se v několika zrnitostních frakcích s největším zrnem od 4 do 8 mm, tvoří 60-90% žárobetonové směsi. [3]

Podle použití lze rozdělit kameniva pro:

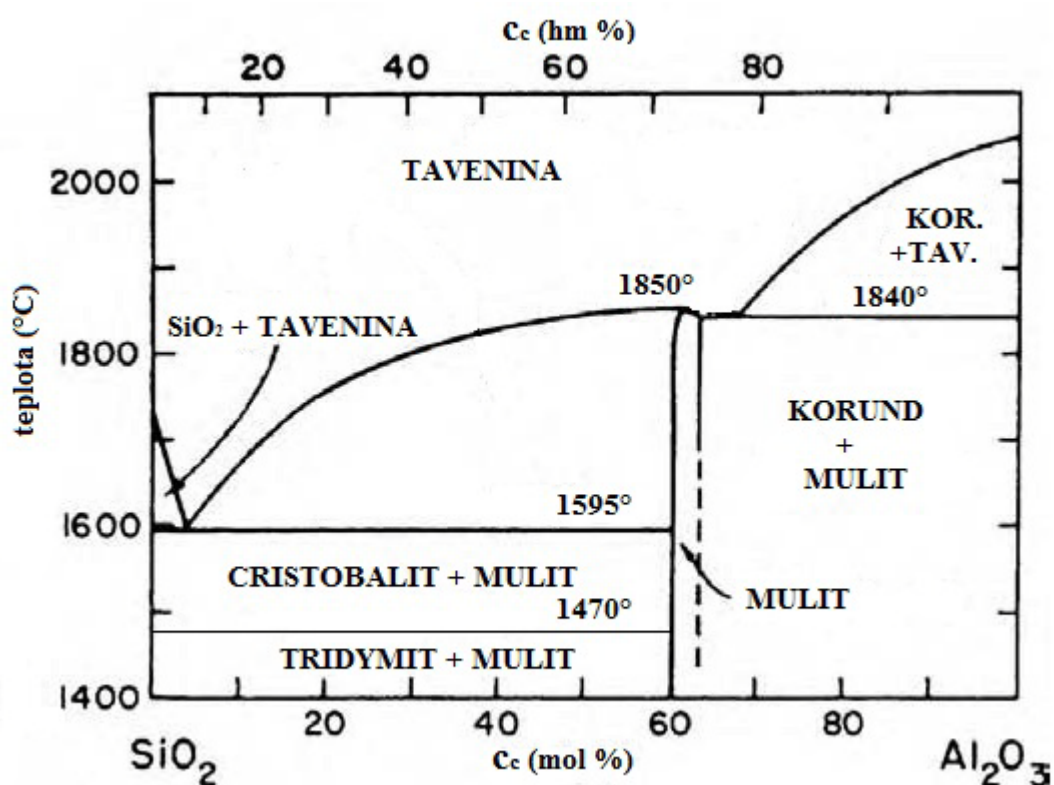
- hutné žárobetony,
- tepelně izolační žárobetony.

*Kamenino pro hutné žárobetony:*

- Hlinitokřemičité – šamotové materiály s obsahem od 10 do 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které se obvykle rozdělují dále na kyselé (pod 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a běžné šamotové materiály (30 až 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Mezi hlinitokřemičité materiály mohou začlenit i křemičité materiály s přísadami, obsahující pod 10%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a 85 až 93%  $\text{SiO}_2$ . Výpalem teoreticky obsahují 64% mullitu a 36% cristobalitu.

Vzhledem k přírodní surovinovým zdrojům jsou hlinitokřemičité materiály (hlavně šamotové) tradičním a nejrozšířenějším druhem žáruvzdorných staviv.

- Vysocehlinité materiály – s obsahem nad 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , lze je rozdělit do 4 skupin (korundy, bauxity, muly, sillimanity) podle obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Pouze sillimanity jsou přírodně těžené minerály, ostatní vznikají výpalem.
- Hořečnaté materiály – obsahují  $\text{MgO}$ , slinuté nebo tavené magnezie. Chemicky obsahují teoreticky 41 %  $\text{MgO}$  a 58%  $\text{CaO}$ , nežádoucími složkami jsou oxidy železa a hliníku. Dalším druhem jsou cordieritová ostřiva, která se využívají v aplikacích náročných na náhlé změny teplot, mají menší obsah  $\text{MgO}$ . [9]



Obr. 4 Binární diagram  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [8]



*Kamenivo pro tepelně izolační žárobetony:*

- Hlinitokřemičitá – lehčené šamoty – jejich pórovitost je nad 50%, mají obvykle velké póry, což zmenšuje izolační schopnost zejména při vyšších teplotách. Použitím mikrosfér (35-39 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), získaných z elektrárenských popílků, lze tepelně izolační vlastnost vylepšit.
- Vysocehlinitá – kameniva vysoké čistoty, dutinová pórovitost způsobuje menší izolační vlastnosti při vysokých teplotách.
- Speciální – různě hydratované křemičitany hlinité, které obsahují oxidy železa, hořčíku, vápníku a alkálie. Při tepelném zpracování expandují, čímž vytvoří pórovité částice s nízkou objemovou hmotností. [9]

### **2.3.2 Pojivo**

Na pojiva jsou kladeny následující nároky:

- umožnit při dané technice zpracování zhotovení dostatečně pevného monolitu,
- zhotovený monolit musí být rozměrově stálý až do teploty použití,
- při teplotě použití se nesmí tvořit tekutá fáze, která by mohla způsobit významný pokles termomechanických vlastností,
- zajistit hmotě snadnou zpracovatelnost a schopnost přiměřeně se ztuhnout,
- zabezpečit, v případě oprávkových hmot, které se nanášejí torkretováním, přiměřenou adhezi na studené nebo horké části vyzdívky.

**Pojivo v žáromonolitech tvoří tyto látky:**

#### **2.3.2.1 Kalciumsilikátové**

Portlandské, směsné cementy obsahující jako základní fáze  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a často i  $\text{SiO}_2$ . Hydraulické složky těchto cementů jsou především sloučeniny  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Hydratací hydraulických fází se zpevňují při pokojové teplotě. V polyfázové soustavě s hlinitokřemičitým ostřivem vznikají taveniny při poměrně nízkých teplotách, proto se toto pojivo vztahuje pouze v žárobetonech určených pro použití při teplotách do max. 1150 °C. Tyto cementy se již v praxi nepoužívají.

### 2.3.2.2 Kalciumaluminátové

Hlinitanové cementy obsahující 50 až 80%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Základní fáze tvoří  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  (CA),  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CA}_2$ ),  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_{12}\text{A}_7$ ) a případně  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Žáruvzdornost těchto cementů vzrůstá se zvyšujícím se obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  přibližně od 1400 °C do 1750 °C. Při pokojové teplotě se hydratací hydraulických fází zpevňují. Teplota použití žárobetonů s hlinitanovým cementem závisí také na jakosti hlinitokřemičitého ostřiva a při použití korundu v kombinaci s cementem obsahujícím 80%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dosahuje až 1800 °C. [1]

Typ	Hlinitanový cement	Hlinitanový cement	Hlinitanový cement
Obsah (%)	40-50	70	80
CaO	37- 44	26 - 29	10 - 20
SiO <sub>2</sub>	3 - 8	< 0,5	< 0,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40 -53	70 -72	> 80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 15	< 0,5	< 0,5
MgO	do 1	-	-

Tabulka 2. Složení cementů používaných jako pojivo do žárobetonových směsí

Za hydraulicky aktivní považujeme však jen CA,  $\text{CA}_2$  a  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ . Hydratizované fáze vznikají po přidání vody k cementu a způsobují tuhnutí. Hydratační rychlost kalciumaluminátových fází je odlišná. Téměř nereaktivní je  $\text{CA}_2$ , reaktivnější je CA a nejvíce reaguje  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ . Ve většině cementů je jako hlavní fáze CA s jinými hydraulickými fázemi. Průběh tuhnutí u cementů závisí na fázovém složení. Za vyšších teplot nastává dehydratace hydratizovaných fází.

Průběh hydratace je závislý na poměru míšení hlinitanových cementů s mikropřísadami, ztekucovací a s regulátory tuhnutí. Všechny hlinitanové hydráty se v pojivu rozkládají na kalcium alumináty. Při běžné pokojové teplotě koexistují hlinitanový gel, hydratované kalcium alumináty a volný oxid hlinitý. Při zvýšení teploty na 200°C probíhá dehydratace, při 400°C se začíná tvořit  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  z amorfních dehydrovaných kalcium aluminátů, při 900°C vzniká podlouhlý CA z reakce oxidu hlinitého a  $\text{C}_2\text{A}$ . Mezi 1000 - 1200°C reaguje CA s oxidem hlinitým za produkce hrubého a zrnitého  $\text{CA}_2$ . Nad teplotou 1300°C reaguje  $\text{CA}_2$  s oxidem hlinitým za produkce šesterečných destiček  $\text{CA}_6$ . Tato morfologie podporuje vzájemné fyzikální vazby mikrostruktury, která zvyšuje teplotní odolnost. [2]

### **2.3.2.3 Kyselina fosforečná nebo fosforečnany**

Používají se hlavně hlinité ( $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ ) nebo hlinitochromité. V kombinaci s  $\text{Al}(\text{OH})_3$  se vytváří chemická vazba už při pokojové teplotě, v kombinaci s  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo s hlinitokřemičitany při sušení. Produkty reakce jsou hygroskopické a stabilní vazba se získá zahřátím na asi 250 °C. Výsledným produktem vysokoteplotní reakce je  $(\text{AlPO}_4)_x$  s teplotou tání 2050 °C, tedy jako  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , proto fosfátová vazba nezhoršuje žárové vlastnosti žáromonolitů.

### **2.3.2.4 Sol $\text{SiO}_2$ na vytvoření vazby procesem sol-gel**

Zpevňují se sušením, výsledným produktem je  $(\text{SiO}_2)_x$ . Přednost aplikace tohoto pojiva spočívá opět v odstranění cementu a tedy  $\text{CaO}$  ze složení žárobetonu, které se tak vrací do dvoufázového systému  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . Vzhledem k tomu, že toto pojivo nereaguje chemicky se složkami žárobetonu, nevytváří se hydráty, které by bylo nutno při ohřevu rozložit. Voda, obsažená ve směsi, pojené vazbou sol – gel, se uvolňuje při teplotě do 120°C. Další ohřev takovéto vyzdívky není ohrožen destrukcí vodní parou. Permeabilita vyzdívky je vyšší, což umožňuje rychlý ohřev na pracovní teplotu bez nebezpečí destrukce, přičemž dosahovaná pórovitost a ostatní fyzikální vlastnosti jsou srovnatelné s materiály LCC a ULCC. [10]

### **2.3.2.5 Anorganické polymery**

Založeny zejména na bázi oxidu hlinitého, např.  $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$ . Zpevňují se sušením, výsledným produktem tepelného zpracování je  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$ . Přispívají tixotropní vlastnosti směsí.

### **2.3.2.6 Tuhé mikropřísky**

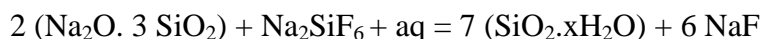
Používá se zejména amorfni  $\text{SiO}_2$ , získané z plynné fáze při elektrometalurgických procesech. Uvádí se velikost částic do 0,15  $\mu\text{m}$ . Používá se jako přísada do tixotropních hmot. Mikrosilika je amorfni oxid křemičitý skládající se ze submikronových kulovitých. Tyto částice tvoří primární aglomeráty, které sestávají z několika kuliček vázaných dohromady materiálovými můstky. Toto široké rozdělení částic přináší pozitivní efekt, protože zvyšuje efektivnost zhutnění částic a zlepšuje zpracovatelnost betonu.

Materiál je vysoce reaktivní v systémech vázaných cementovou nebo keramickou vazbou. Jeho použití vede ke zlepšení keramické vazby, například tvorbou mullitu, při nižších vypalovacích teplotách. Hlavní funkcí mikrosiliky v žárobetonech je funkce plniva. Správně

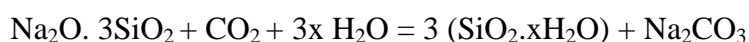
rozptýlená mikrosilika vyplňuje prostory mezi hrubšími částicemi, čímž uvolňuje zadržovanou vodu a systém zhutňuje. Při výrobě žárovzdorných materiálů je však používání křemičitého úletu, v kombinaci s hlinitanovými cementy, jako mikroplniva omezeno. Tvoří se nízkotavitelné sloučeniny v soustavě CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub>. [1][2]

### **2.3.2.7 Koloidní roztoky alkalických křemičitanů (vodní sklo)**

Případně v kombinaci s fluorokřemičitany, kdy ke zpevnění dochází již při pokojové teplotě. Tyto vazbotvorné látky vnášejí do žáromonolitů alkálie, čímž se snižuje teplota použití podle jejich množství a druhu ostřiva pod 1000 °C. Vzniklý kyselinovzdorný tmel je zpevněn vyloučeným gelem kyseliny křemičité, který spojuje zrna písku. Pro urychlení reakce se používají tzv. urychlovače tuhnutí, např. hexafluorokřemičitan sodný. Zpevňování vyjadřuje rovnice:



Zpevňování tmelu nastává například iv důsledku reakce vodního skla se vzdušným CO<sub>2</sub>:



Vzniklý tmel je odolný proti účinku kyselin, protože SiO<sub>2</sub>·xH<sub>2</sub>O se v kyselinách nerozpouští. Kyseliny napomáhají vylučování tohoto gelu a tím jeho stabilitu a pevnost ještě zvyšují. Neodolávají však čisté vodě a roztokem alkálií (reakce SiO<sub>2</sub> s alkáliemi při vzniku křemičitanů).

## **2.4 Mikroplniva**

Výrazně ovlivňují chování žárobetonových směsí. Vyznačují se velikostí pod 1µm. Jsou nejjemnější pevnou složkou ztekucených žárobetonových směsí. K mikroplnivům řadíme mikrosiliku, aktivní oxidy hlinité a přísady. Mikropřísady jsou obvykle oxidické mikrometrové až submikrometrové (nanometrové) částice. Jejich přítomnost umožňuje dosažení optimální zrnitosti směsí v nejjemnějších frakcích. Při zpracování ovlhčených směsí na žáromonolit mikropřísady rozhodujícím způsobem ovlivňují reologické chování hmot, tj. jejich zpracovatelnost, a mají významný vliv na vlastnosti finálního žáromonolitického výrobku.

### 2.4.1 Mikrosilika

Křemičitý úlet vzniká jako vedlejší produkt při karbotermické výrobě kovového křemíku. U největšího producenta funguje v současné době technologický proces tak, že mikrosilika se získává jako hlavní produkt.

Mikrosilika je amorfní oxid křemičitý, který se skládá ze submikronových kulovitých částic s průměrem do 0,20  $\mu\text{m}$ . Tyto částice pak přinášejí pozitivní efekt, protože zvyšují efektivnost zhutnění částic a zlepšují zpracovatelnost betonu, jeho použití také vede ke zlepšení keramické vazby, například tvorbou mullitu při nižších vypalovacích teplotách. Správně rozptýlená mikrosilika vyplňuje prostory mezi hrubšími částicemi, čímž uvolňuje zadržovanou vodu a systém zhutňuje. Měrný povrch je cca 20  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Je dostupná v několika produktech obsahujících 78 až 99 %  $\text{SiO}_2$  a 1 až 12 % průvodních oxidů, uhlíku a případně též Si a SiC. Průvodní složky negativně ovlivňují nejen reologické chování směsí s mikrosilikou, ale v důsledku vzájemné reakce s dalšími složkami směsi též termomechanické vlastnosti finálního výrobku. Z tohoto důvodu se při výrobě žáromonolitů dává přednost mikrosilice vysoké čistoty, tedy obsahem cca 97,5 %  $\text{SiO}_2$ .

Mikrosilika výrazně zlepšuje zpracovatelnost žárobetonových hmot. Kromě submikrometrové velikosti částic se tato vlastnost připisuje též kulovému tvaru a dobré dispergovatelnosti částic, s úspěchem s tak používá zejména ve směsích na výrobu ztekucených nízkocementových žárobetonů na bázi hlinitokřemičitých kameniv. Jako optimální se nejčastěji hodnotí přídavek 5 % mikrosiliky na hmotnost žárobetonových směsí.

[3]

### 2.4.2 Reaktivní oxidy hlinité

Další skupinou mikroplniv jsou tzv. reaktivní oxidy hlinité. V čistých  $\text{Al}_2\text{O}_3$  soustavách s cementovou vazbou způsobuje mikrosilika v matrixu značný pokles termomechanických vlastností. Proto se v žárobetonech s nízkým obsahem cementu používají tzv. reaktivní oxidy hlinité – velmi čisté kalcinované oxidy hlinité (obsah původních oxidů <0,4%) se střední velikostí částic od 0,1  $\mu\text{m}$ . Obvykle obsahují 99,8 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Vzhledem ke způsobu přípravy - mikromletím aglomerátů drobných krystalů korundu - se tvar jednotlivých krystalů a stupeň jejich aglomerace výrazně liší od mikrosiliky. Z použití těchto prášků reaktivního oxidu hlinitého, tak vyplývá i jejich méně výrazný pozitivní účinek na zpracovatelnost směsí ve srovnání s mikrosilikou.

Reaktivní oxidy hlinité jsou dostupné o různé zrnitosti charakterizované měrným povrchem od 5 do 11 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> a střední velikostí částic od 0,2 do cca 5,0 μm, tyto produkty se vyznačují vysokou reakční schopností s dalšími složkami matrixu. K dispozici jsou též reaktivní oxidy hlinité obsahující spinel (MgO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Do této skupiny lze mezi mikropříspěvky zařadit též i velmi jemně mletá slinutá nebo tavená korundová nebo spinelová kameniva obsahující cca 99,5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s deklarovanou zrnitostí pod 20 μm, ale ve skutečnosti se střední velikostí částic cca 3,5 μm. Jejich přítomností v žárobetonových směsích se zvyšuje rozměrová stálost matrixu. [3] [2]

## 2.5 Přísady

Z důvodu zpracování a uložení je podmínkou, aby si ovlhčené žárobetonové směsi zachovaly v době zpracování konstantní konzistenci a následně v poměrně krátkém čase ztuhly. Tak získají potřebné manipulační pevnosti potřebné na odbednění monolitů nebo odformování prefabrikátů. Takové chování závisí na teplotě při zpracování, ale lze jej ovlivnit regulátory tuhnutí, které se dělí na zpomalovače a urychlovače tuhnutí.

Protože matrix nízkocementových a bezcementových žárobetonů představuje poměrně komplikovanou mnohosložkovou koloidní soustavu, obvykle se pro kontrolu reologických vlastností hmot používá současně několik přísad. Úkolem takové směsi přísad je udržet ztekucenou soustavu, tedy zajistit potřebnou dobu zpracovatelnosti směsi a potom kontrolovaným způsobem zajistit změnu vlastností hmoty tak, aby ztuhla a získala potřebnou manipulační pevnost.

Někteří dodavatelé surovin vyrábějí a nabízejí hotové směsi obsahující všechny potřebné přísady, které v průmyslové praxi značně zjednodušují použití žárobetonů. Při používání hotových přísad je třeba brát v potaz, že sestavení těchto přísad jsou bezpečně účinné jen při použití se surovinami od daného dodavatele.

### 2.5.1 Zpomalovače tuhnutí

Jako zpomalovače tuhnutí se používají různé přísady, jejichž úlohou je určitým způsobem zpomalit rozpouštění iontů Ca<sup>2+</sup> v roztoku a tím zpomalit hydrataci cementu a ovlivnit tím související změny v konzistenci směsi. Mechanismus působení zpomalovačů tuhnutí cementu popisuje několik teorií:

- tvorba komplexních sloučenin,

- tvorba nerozpustné vrstvy na povrchu částic cementu,
- adsorpce makromolekul, která brání ve styku s molekulami vody,
- přísada brání nukleaci krystalů.

Anhydrit	Kyselina boritá
Borax	Kyselina citronová a její sodné soli
Celulóza	Kyselina octová
Cukr	Kyselina vinná a její soli
Fosforečnany	Lignosulfonáty
Glukonáty	Sádrovec
Hydroxid horečnatý	Škrob
Chlorid horečnatý	Ztekucovadla - všeobecně

Tabulka 3. Používané zpomalovače tuhnutí

### 2.5.2 Urychlovače tuhnutí

Na druhé straně, v případě potřeby urychlení tuhnutí hmoty se používají urychlovače tuhnutí. Nejznámějšími urychlovači jsou lithné soli. Jejich účinek spočívá v podstatě v tom, že lithium tvoří nerozpustný hlinitan, čímž se zvyšuje poměr  $\text{Ca}^{2+}/\text{Al}(\text{OH})_4^-$ . To následně vede ke zrychlení vzniku nových hydrátů.

Dávkování zpomalovačů tuhnutí i ostatních přísad do moderních žárobetonových směsí musí být velmi přesné. Příkladem účinek citrátu sodného jako zpomalovače tuhnutí se připisuje tvorbě málo rozpustného citrátu vápenatého, tím se v roztoku snižuje koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  při počáteční hydrataci cementu. Pokud by byl přídavek citrátu vysoký, tak by se v důsledku přebytku iontů sodíku v roztoku prudce zvýšila hodnota pH a výsledným efektem by bylo zrychlení hydratace.

Anhydrit	Křemičitan draselný
Hemihydrát	Křemičitan sodný
Hydratovaný kalciumaluminátový cement	Lithné soli
Hydroxid draselný	Portlandský cement
Hydroxid sodný	Sádrovec
Hydroxid vápenatý	Uhličitan draselný

Tabulka 4. Používané urychlovače tuhnutí

## 2.6 Charakteristické vlastnosti žárobetonů

Určováním vlastností materiálů se sledují dva cíle:

- Kontrola jakosti výrobků porovnáváním stanovených jakostních parametrů s parametry předepsanými v normách jakosti nebo v technických podmínkách. Při kontrole jakosti výrobků se používají obvykle normované metody zkoušení. Sledují se vlastnosti, které poskytují základní přehled jakosti staviv a rovnoměrnosti výroby, jako jsou kritéria hutnosti, chemické složení, mechanické a některé termomechanické vlastnosti.
- Určení optimálních druhů materiálů pro různé použití, na podklady umožňující správné konstrukční řešení žáruvzdorných vyzdívek, pro režim ohřevu a chlazení a pro tepelně technické výpočty.

Při sledování těchto cílů se nevystačí s jakostními parametry uváděnými v normách jakosti žáruvzdorných materiálů. Je tedy nezbytné stanovovat další vlastnosti, jako např. teplotní roztažnost, tepelnou vodivost, modul pružnosti a další tepelné, termomechanické a termochemické vlastnosti. Platí zásada, že užitečnou hodnotu žáruvzdorných výrobků nelze posoudit podle jedné vlastnosti, ale na základě znalosti celého komplexu vlastností. [12]

**Nejdůležitějšími kritérii pro chemicky agresivní prostředí žáromonolitů jsou:**

- hutnost,
- odolnost proti náhlým změnám teplot.

### 2.6.1 Hutnost

Hutností se rozumí stupeň zaplnění prostoru tuhými fázemi a vyjadřuje se v procentech objemu tuhých fází nebo jako podíl objemové hmotnosti a hustoty. Nezaplněné prostory, čili póry v žáruvzdorném výrobku snižují hmotnost objemové jednotky, zvětšují povrch tuhých fází, a tím podstatně ovlivňují mechanické a tepelné vlastnosti a odolnost proti chemickým účinkům prostředí.

Je proto velmi důležité, aby materiál, který přichází do styku s roztavenými kovy, struskami, sklem, agresivními parami, měl nízkou pórovitost. Pro popis však nelze vystačit jen se stanovením zdánlivé pórovitosti, ale je nutné sledovat četnost a distribuci pórů. Pro výběr ostřiva použitého k vyrobení produktu je pórovitost základní charakteristikou, protože



špatnou volbou, bez znalosti pórové struktury, nelze spolehlivě a správně určit technologii výroby. Množství i tvar pórů vznikajících při výrobě žárobetonu je závislý na technologickém postupu aplikace.

Při hodnocení kritérií hutnosti se měří:

- množství pórů (otevřených, uzavřených, všech),
- velikost pórů,
- spojitost pórů. [1]

#### **2.4.1.1 Množství pórů**

Množství pórů charakterizují tato kritéria:

Nasákavost (NV) – procentní poměr hmotnosti vody pohlcené vzorkem k hmotnosti vzorku, vyjádřený v procentech hmotnosti vysušeného vzorku.

Zdánlivá pórovitost (PZ) – procentní poměr objemu otevřených pórů zkušebního vzorku k jejímu objemu včetně pórů a dutin, vyjádřený v procentech objemu vzorku.

Skutečná pórovitost (PS) – procentní poměr objemu otevřených a uzavřených pórů vzorku k jejímu objemu včetně pórů, vyjádřený v procentech objemu vzorku.

Objemová hmotnost (OH) – hmotnost objemové jednotky vysušeného vzorku včetně otevřených i uzavřených pórů, vyjádřená v  $\text{g.cm}^{-3}$ .

Hustota  $\rho$  – hmotnost objemové jednotky vysušeného vzorku bez pórů, vyjádřená v  $\text{g. cm}^{-3}$ .

Zdánlivá hustota (ZH) – hmotnost objemové jednotky vzorku včetně uzavřených pórů, vyjádřená v  $\text{g.cm}^{-3}$ .

Pro stanovení množství pórů hutných tvarových staviv jsou určeny metody dle ČSN 72 5010 principiálně shodné s normou ISO 5017. Vysušené a zvážené vzorky se při použití vakua nasatí vodou (při hydratujících látkách jinou kapalinou), zváží a vypočte se jejich nasákavost.

Objem vzorků se zjistí hydrostatickým vážením a vypočte se objemová hmotnost, zdánlivá pórovitost a zdánlivá hustota. [1]

#### **2.4.1.2 Velikost pórů**

Studium pórů z hlediska rozdělení jejich velikosti má velký význam při zkoumání procesů koroze a odolnosti proti náhlým změnám teplot žáruvzdorný materiálů. Používají se metody využívající kapilární depresi rtuti nebo kapilární elevaci vody.

Rtuť proniká do pórů pouze účinkem tlaku. Se zvyšováním tlaku vniká rtuť do stále menších pórů. Mezi poloměrem pórů ( $r$  - předpokládá se kruhový průřez pórů), úhlem smáčení stěn pórů ( $\theta$ ), povrchovým napětím ( $\delta$ ) a tlakem, pod kterým se póry zaplňují ( $p$ ) platí vztah:

$$r = \frac{2\delta \cdot \cos \theta}{p}$$

Povrchové napětí rtuti je přibližně  $0,48 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ , úhel smáčení se pro různé materiály pohybuje od  $100^\circ$  do  $160^\circ$ , při běžných měřeních se počítá s hodnotami  $130$  až  $140^\circ$ .

Zkoušený vzorek se vkládá do speciálního skleněného pyknometru s měřicí kapilárou, evakuuje se, zalije rtutí a při zvyšování tlaku se měří pokles hladiny rtuti v kapiláře, odpovídající množství vtlačování rtuti. Po dosažení atmosférického tlaku (když rtuť vnikla do pórů o poloměru nad přibližně  $7,5 \mu\text{m}$ ) se pyknometr vloží do autoklávu vysokotlakého rtuťového porozimetru a měření pokračuje při vyšších tlacích, většinou do  $100 \text{ MPa}$ , když rtuť vniká do pórů s poloměrem přibližně  $0,0075 \mu\text{m}$ .

Princip kapilární elevace vody se využívá při postupu založeném na vytěšňování vody z tělíska vzduchem. Zkušební váleček se nasytí ve vakuu vodou, a pak se vystaví jednostranně působícímu, postupně se zvyšujícímu tlaku. Tělískem začne proudit vzduch při takovém tlaku, při kterém se voda vytěšňuje z největších pórů o průměru daným kapilárním zákonem. Voda při dalším zvyšování tlaku se vytěšňuje ze stále menších pórů. Velikost průchozích pórů se vyhodnocuje ze vztahu působícího tlaku a množství procházejícího vzduchu. [1]

### 2.4.1.3 Spojitost pórů

Hodnocením propojení pórů se doplňují údaje o pórovitosti při posuzování žáruvzdorných staviv vystavených při použití korozivnímu působení tavenin, při posuzování materiálů používaných v keramických rekuperátory a mufle na oddělení dvou prostorů v tepelných zařízeních a při hodnocení prodyšných tvarovek.

Spojitost pórů v žáruvzdorných výrobcích se posuzuje stanovením propustnosti pro plyny, která se definuje jako vlastnost pórovitých těles propouštět plyn při rozdílu tlaku plynu na protilehlých stranách tělesa.

Podle normy ISO 8841.2 a podle ČSN 72 6020 se propustnost pro plyny stanoví na válečku, který se vloží do držáku, kterým se utěšňuje válcová část jeho povrchu. Na jednu základnu vzorky působí se při zvýšeném tlaku vzduchem nebo jiným plynem. Nastaví se

určitý rozdíl tlaků před tělískem a za ním a po ustálení průtoku se měří množství plynu přecházející za časovou jednotku a rozdíl tlaků. Měří se při třech různých rozdílech tlaku. Vypočítané propustnosti při různých tlakových podmínkách se mohou lišit nejvíce o 5%. Tím se ověřuje laminárnost proudění plynu, jako podmínka platnosti výpočtového vzorce.

$$\mu = v \frac{h}{A} \frac{l}{\Delta p} q_1 \quad (m^2)$$

kde:

v... je dynamická viskozita plynu procházejícího tělískem při teplotě zkoušky (Pa. s)

h... výška tělíska (m),

A... průřez tělíska (m<sup>2</sup>),

$\Delta p$ ... rozdíl tlaků před a za tělískem (Pa),

$q_v$ ... průtok plynu tělískem (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).

Tento základní vzorec se obvykle upravuje na praktické použití tak, aby bylo možné počítat přímo s měřenými hodnotami. Propustnost pro plyny se pak vyjadřuje v cm<sup>2</sup> (ISO) nebo v μm<sup>2</sup> (ČSN). Dle ČSN se kromě toho propustnost přepočítává na teplotu 0 °C a normální tlak (1,013.10<sup>5</sup> Pa).

## 2.6.2 Odolnost proti náhlým změnám teplot

Žárovzorné materiály se v praxi často vystavují velkému kolísání teplot. Jelikož je na vyrovnání teplot vždy potřeba určitá doba, vznikají během těchto kolísání teplot uvnitř materiálu teplotní rozdíly (teplotní gradienty). Tyto teplotní rozdíly způsobují rozdílnou teplotní roztažnost, která vede k mechanickým napětím v celém objemu zatížení vystavenému materiálu. Překročí - li toto napětí únosnost materiálu, dochází k tvorbě trhlinek. Citlivost na změnu teplot je jednou z hlavních vlastností žárovzorných materiálů.

Velký vliv na vznik trhlin má prudké ochlazení. Při tomto ochlazení klesá teplota ve směru ke středu v důsledku chladnějších vrstev na povrchu materiálu v místě styku s chladnějším okolím. Vnější povrch se začne smršťovat a tím vzniká značné tahové napětí. Žárovobeton odolává tahovým napětím jen málo, což může vést k následnému vzniku trhlin. Při opačném ději, jakým je rychlé zahřívání, má vnější plášť větší teplotu než vnitřní část a materiál je vystaven tlakovému napětí. Ve vnějších vrstvách tak dochází k velkému smykovému napětí, které způsobuje klasické odlupování vrstev a někdy dokonce oddělení větší části materiálu.

Dle Din 51 068 Teil 1 princip spočívá v ochlazování zkušebních těles ve tvaru válečků, o rozměrech 50x50 mm nebo 36x36 mm. Jejich teplota je zchlazena z 950°C na 10°C – 20°C ponořením do studené vody, na dobu 3 minut.

Zkouška se provádí tak dlouho, dokud se těleso nerozpadne na dva nebo více kusů, nebo pokud je hotových 30 cyklů. Při rozpadu tělesa je počítán i cyklus, při kterém došlo k destrukci.

#### **2.4.2.1 Vliv teplotní roztažnosti**

Vzhledem k tomu, že pojivo a kamenivo v žárobetonech mají rozdílné teplotní objemové změny, musí být nalezen mezi těmito hodnotami kompromis, který povede k odolnosti a soudržnosti materiálu jako celku. Při vysoké teplotní roztažnosti vzniká za vyšších teplot tlakové napětí, kdežto při teplotní roztažnosti nižší pak napětí tahové.

Teplotní roztažnost heterogenních směsí nelze určit jako součet pohybů jednotlivých komponentů, ale jako vzájemné překrývání se roztažnosti, čímž vzniká vnitřní strukturní napětí. Tato napětí mohou být značně velká a vést k tvorbě vlasových trhlin spojených s nárůstem napětí nebo krystalových lomů. Tahová napětí působí mnohem intenzivněji než tlaková, protože odpor proti tlakovým napětím bývá větší než u napětí tahových. Optimální hodnota teplotní délkové roztažnosti žárobetonů závisí především na heterogenitě a rozložení pórů. Nízký koeficient teplotní roztažnosti zajišťuje dobrou odolnost materiálu proti změnám teplot.

### **3 Koroze žárovzdorných materiálů**

Při použití jsou žárovzdorné materiály vystaveny chemickému a fyzikálnímu působení okolního prostředí. Při vysokých teplotách probíhají vzájemné reakce mezi pevnými látkami, čili mezi vyzdívkou a plynnými a někdy i kapalnými látkami nacházejícími se v pecních prostředích, které způsobují opotřebení - korozi žárovzdorných materiálů. Koroze taveniny v daném případě je složitým termochemickým a termofyzikálním procesem. Probíhající termochemické reakce lze určit z termodynamických kritérií rovnovážných stavů, jejich kinetiku ovlivňují různé fyzikální, navzájem se překrývající jevy.

#### **Mechanické vlivy**

#### **Chemické působení na různých rozhraních**

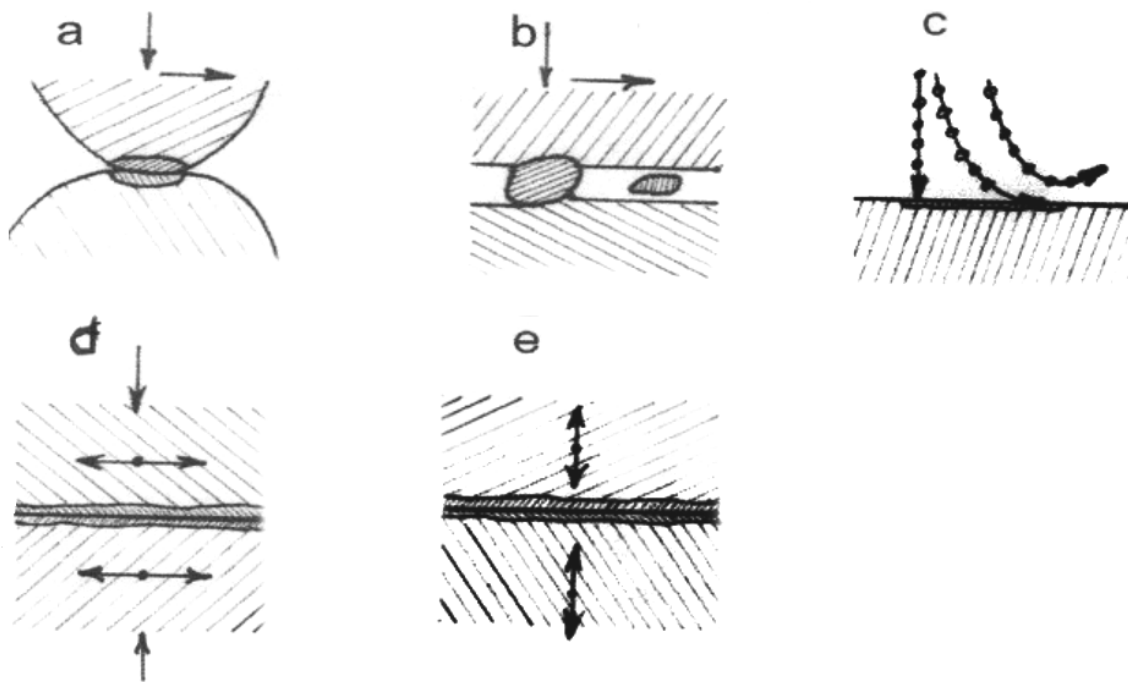
### **3.1 Mechanické vlivy**

Mechanická reakce na rozhraní tuhých fází vzniká mechanickým namáháním a vzájemnými kmitavými pohyby na kontaktu dvou nebo více tuhých materiálů. Vzájemný pohyb, způsobující toto mechanické opotřebení může mít různý původ (např. mechanický nebo tepelný).

Podle původu a průběhu mechanického opotřebení na fázovém rozhraní tuhá fáze-tuhá fáze, můžeme hovořit o těchto základních druzích mechanického působení (obr.5):

- Adhezivní
- Abrazivní
- Erozivní
- Únavové
- Vibrační

Plastická deformace tuhých fází vyvolává zvýšení hustoty dislokací, ale i vznik mřížkových poruch vznikajících při pohybu dislokací na fázovém rozhraní tuhých fází, resp. v povrchové vrstvě. Generování mřížkových poruch způsobuje zvýšení koeficientů difúze a tím i intenzivnější infiltraci pronikajících atomů (iontů) v této vrstvě.



Obr. 5 Základní druhy mechanického opotřebení [13]

a – adhezivní, b – abrazivní, c – erozivní, d – vibrační, e – únavové.

### 3.1.1 Adhezivní působení

Nastává při relativním pohybu dvou funkčních povrchů, které jsou k sobě tlačené určitou silou. V důsledku makro a mikronerovností obou povrchů nedochází ke styku povrchů na celé obrysové ploše, ale jen na malých dotykových ploškách, přičemž se vrcholky nerovností elasticky a plasticky deformují. Při vzájemném pohybu obou povrchů dochází ke tření, při kterém se vrcholky nerovností mohou porušit a na porušených dotykových ploškách se vlivem adhezních sil tvoří mikrospoje.

Adhezivní opotřebení nastává porušením těchto adhezivních mikrospojů, ke kterému dochází buď na původní ploše dotyku obou mikronerovností, nebo pod povrchem jednoho z dvojice materiálů. Tímto mechanismem se mohou částice jednoho materiálu přenést na povrch druhého. [13]

### **3.1.2 Abrazivní působení**

Abraze je definována jako obroušování pevného povrchu abrazivním médiem a eroze je definována jako přemísťování, resp. odnášení látek z původní hmoty povrchovou činností erozivních médií. [13]

Abraze a eroze představují mechanické opotřebení žáruvzdorných materiálů vlivem nepravidelných nárazů plynných, kapalných a pevných fází.

Z uvedených definic je zřejmý i průběh mechanického opotřebení žáruvzdorných materiálů, vlivem nepravidelných nárazů na jejich povrch v proudícím prostředí dochází k únavovému porušení povrchu vyzdívky. Ve vyzdívce vznikají nevratné plastické deformace, které se kumulují, až nastane únavové porušení materiálu. Průběh tohoto poškození je podobný jako při poškození žáruvzdorné vyzdívky tepelnou únavou. Může jít o erozi a abrazi plyny, parami, taveniny nebo tuhou vsázkou, plynném nebo kapalném prostředí. Například při pulzním hoření paliva a následném pohybu spalin v okolí žáruvzdorného materiálu vzniká třecí opotřebení vlivem nepravidelných rázů těchto plynných médií na žáruvzdornou vyzdívku (pulzování plamene v hořácích), které způsobuje i vibrace vyzdívky.

### **3.1.3 Erozivní působení**

Jeho podstatou je poškozování funkčních povrchů cizími částicemi nesenými proudícím médiem plynu nebo kapaliny, nebo samotným proudícím plynem, párou nebo kapalinou (taveninou).

Účinkem erozivní opotřebení nastává rýhování funkčních ploch a oddělování povrchových částíček materiálu. Pro tento druh opotřebení je typická nerovnoměrnost opotřebení funkčního povrchu.

Erozivní opotřebení unášenými tvrdými částicemi se vyskytuje v proudu kapaliny (např. písek ve vodě, tuhá vsázka v tavenině a jiné), nebo v proudu plynu (např. částice prachu, nebo kapky kondenzovaných fází ve spalinách a jiné).

V důsledku rozdílné hustoty proudícího média a jím unášených částic dochází k erozivnímu opotřebení přednostně v místech změny směru proudění.

### 3.1.4 Únavové působení

Vzniká únavovým procesem v povrchové vrstvě materiálu při kmitavém kontaktním namáhání dvou těles. Poškození povrchu při tomto opotřebení se projevuje oddělováním porušených povrchových vrstev a vznikem jamek na povrchu. Výskyt únavového opotřebení souvisí s kmitavým namáháním povrchu materiálu, které obvykle nastane při opakovaném nárazu dvou povrchů. Únavové opotřebení povrchu může znamenat pouze snížení funkční schopnosti, nebo vzniklá povrchová jamka vytvoří ohniště únavového lomu, který se postupně rozšíří na celý průřez.

### 3.1.5 Vibrační působení

Podstatou je oddělování částic a poškozování funkčního povrchu na styčných plochách dvou pevně spojených těles při jejich nepatrném kmitavém tangenciálním pohybu a při vysokém měrném tlaku. Mechanismus vibračního opotřebení není dosud zcela vysvětlen. Kromě mechanického účinku se zde ve značné míře uplatňují chemické reakce, resp. produkty těchto reakcí. Proto se tento proces nazývá styková, resp. vibrační koroze. Dochází zde ke vzniku jemných částic v mechanicko-korozním procesu vibračního opotřebení. Vibrační koroze může být i příčinou únavového lomu iniciovaného na poškozeném povrchu.

V reálných podmínkách se často jednotlivé druhy mechanického působení navzájem kombinují a modifikují podle podmínek, při kterých se proces opotřebení uskutečňuje. V procesu mechanického opotřebení se částice na rozhraní tuhá fáze – tuhá fáze:

- Přemísťují v rámci jednoho povrchu (zejména plastickou deformací)
- Přemísťují (přenášejí) na druhý povrch
- Oddělují (vytrhávají) z povrchu.

Účinkem těchto změn se zhoršuje kvalita povrchu, v důsledku čehož přestává povrch plnit svou původní funkci. [13]



## 3.2 Chemické působení

Při působení některých chemických kapalných činidel (např. voda, roztoky kyselin a hydroxidů) na žáruvzdorný materiál, hlavně při nízkých teplotách (do cca 300 ° C), může docházet k chemické reakci s jednotlivými pevnými fázemi za vzniku nových sloučenin. Můžeme zde zařadit, hlavně reakce s roztoky kyselin a zásad. Tyto reakce nejsou spojeny se vznikem elektrického proudu. Elektrochemická koroze se běžně u žáruvzdorných keramických materiálů nevyskytuje. V případě reakcí při vysokých teplotách dochází na povrchu pevné fáze ke kontaktu s taveninou (kapalná fáze), která může být tvořena oxidy (strusky), sulfidy, chloridy nebo roztaveným kovem. [13]

Produkty reakcí se tvoří často na styku jednotlivých prostředí a většinou dochází i k jejich rozpouštění v kapalně fáze.

Chemické působení můžeme rozdělit následující procesy:

- Hydrataci
- Reakce s roztoky kyselin a hydroxidů
- Chemická koroze taveniny

Koroze žáruvzdorných materiálů je složitý termochemický a termofyzikální proces. Probíhající termochemické reakce je možné stanovit z termodynamických kritérií rovnovážných stavů, jejich kinetiku ovlivňují různé fyzikální, navzájem se překrývající jevy. Koroznímu působení kapalin nejméně odolává skelná fáze žáruvzdorných materiálů. Otevřené póry tento proces usnadňují, protože zvětšují kontaktní povrch. [14]

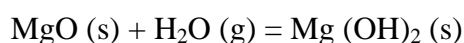
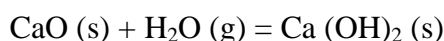
### 3.2.1 Hydratace

Je reakce mezi molekulami vody s molekulami nebo ionty jiných látek, přičemž se voda použije jako součást chemické struktury vytvořených hydrátů. V některých hydrátech chemická individualita vázaných molekul vody úplně zaniká a v struktuře těchto látek jejich již nelze chemicky vyjádřit. Jsou to především hydroxidy nebo kyseliny, které lze považovat za hydráty počátečních oxidů (např.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

V jiných hydrátech zůstává chemická individualita obsažených molekul vody zachována, protože tyto molekuly jsou ve struktuře hydrátů vázány chemickými vazbami různého druhu. Mezi hydráty patří krystalohydráty a akvakomplexy. Některé látky se vylučují z vodných roztoků ve formě krystalů, které obsahují určitý počet molekul vody, připadající na

každý soubor atomů daný stechiometrickým vzorcem. Takové látky se nazývají krystalohydráty a příslušná voda se nazývá krystalová (např.  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ ). Krystalová voda je součástí krystalové struktury krystalohydrátů a přímo ovlivňuje jejich fyzikální, případně chemické vlastnosti. Mírou stálosti krystalohydrátů je tlak vodní páry, který je při dané teplotě v rovnováze s krystalohydrátem. Akvakomplexy jsou sloučeniny, ve kterých se voda váže koordinační vazbou a vstupuje do vnitřní koordinační sféry komplexů (např.  $[\text{CuCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2]$ ). Vznikají ve vodných roztocích solí kovů v důsledku hydratace kationtů i v krystalových strukturách krystalohydrátů.

Hydratace má podstatný vliv na mnohé vlastnosti iontů ve vodných roztocích. V případě hydratace žáruvzdorných materiálů jsou rozhodující reakce  $\text{CaO}$ , resp.  $\text{MgO}$  s vodní párou, příp. vodou podle následujících reakcí:



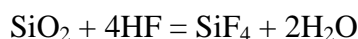
Kinetiku těchto reakcí ovlivňuje pórovitost žáruvzdorných materiálů, vlastnosti reakční atmosféry (teplota, parciální tlak vodní páry apod) a vliv přídavných látek (hlavně na snížení tepelné roztažnosti, pórovitosti a zvýšení odolnosti vůči hydrataci). Hydratované složky žáruvzdorných materiálů zvětšují svůj objem, v atakované vrstvě se mění mechanické vlastnosti vyzdívky, mění se fázové složení a struktura střepe. Při ohřevu dochází k zpětnému rozkladu hydrátů na oxidy a volnou vodu (např. hydroxid vápenatý se rozkládá při  $580 \text{ }^\circ\text{C}$ , hydroxid hořečnatý (brucit) se rozkládá v intervalu  $340$  až  $380 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Vznikající oxidy mají nízkou pevnost, velký reakční povrch a vysokou reaktivitu. V dehydroxydované oblasti dochází k intenzivnímu opotřebení střepe žáruvzdorného materiálu. [13]

### 3.2.2 Reakce s roztoky kyselin a zásad

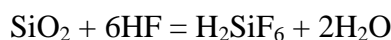
Silikátová fáze má menší odolnost vůči louhům jako vůči vodě. Reakce alkalického roztoku se silikátovou fází probíhá tak, že hydroxidové skupiny  $\text{OH}^-$  štěpí silikátové řetězce a tvoří polykřemičité kyseliny s krátkými řetězci. Dalším působením alkalického činidla vzniká kyselina křemičitá a její soli, které jsou snadno rozpustné ve vodě. Vyluhováním křemičité skelné fáze se uvolňuje krystalická fáze střepe. [13]

Koroze žáruvzdorného materiálu (skleněné fáze) kyselinou fluorovodíkovou probíhá podobným mechanismem, rychlost této reakce je ale podstatně vyšší.

Kyselina fluorovodíková silně koroduje i křemičité krystalické fáze, podle rovnice:



nebo



Působení kyseliny fluorovodíkové na křemičitý střepek je velmi intenzivní. Například 38% kyselina fluorovodíková během několika hodin při pokojové teplotě zcela rozpustí porcelán. Stanoví se i rychlost koroze  $v_{kor}$  na vzorcích různých tvarů:

$$v_{kor} = \frac{d\Delta M}{d\tau}$$

kde

$\Delta M$ ... je úbytek hmotnosti vzorku vztažen na jednotku povrchu zkušebního tělesa ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) za určitou dobu (nejčastěji 1 den),

$\tau$ ...je čas.

Se stoupající teplotou se z pravidla rychlost koroze zvyšuje. Teplotní závislost rychlosti koroze žárovzdorného materiálu lze popsat Arrheniovou rovnicí, která v semilogaritmickém vyjádření má tvar:

$$\ln v_{kor} = \frac{a}{T} + b$$

kde:

a, b... jsou konstanty

T...termodynamická teplota, v kelvinech

Odolnost žárovzdorných materiálů vůči působení chemických činidel je možno ovlivňovat změnou chemického a fázového složení, resp. změnou mikrostruktury. Např. při zvyšování obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v žárovzdorném materiálu zvyšuje se jeho odolnost vůči kyselině fluorovodíkové, ale klesá jeho odolnost proti působení kyseliny sírové. [13]

### 3.2.3 Chemická koroze taveninou

Z kinetického hlediska lze vzájemnou reakci žáruvzdorného materiálu a taveniny posuzovat jako proces rozpouštění tuhé látky v kapalině. Hmotnostní úbytek žáruvzdorného materiálu vznikající jeho rozpouštěním v tavenině jako kritický jev definuje rychlostní konstanta a aktivační energie. Je to speciální případ kinetiky heterogenních reakcí v soustavě tuhé a kapalné látky, ve které je tuhá látka zvlhčená kapalinou a reakční produkt v kapalině je rozpustný.

Takový proces se skládá ze tří dílčích dějů:

- Transport reakčních složek k rozhraní.
- Reakce na rozhraní fází.
- Transport reakčního produktu do kapalné fáze.

Rychlost procesu určuje nejpomalejší z těchto dějů. Při rozpouštění žáruvzdorných materiálů ve viskózních taveninách bývá řídicím jevem transport hmoty, to znamená difúze. Podle toho, zda převod hmoty probíhá v nehybném nebo v proudícím prostředí, rozlišuje se molekulární a konvektivní difúze. V prvním případě jde o neustálý děj, ve druhém se po krátkém čase ustálí určitý difuzní tok.

Proudění značně ovlivňuje průběh difúze, a tím i rychlost rozpouštění tuhé látky. Kapalina proudí ve směru rovnoběžném s povrchem a molekulární difúze probíhá v kolmém směru na povrch. To ovlivní koncentrační gradient, který se v nehybném prostředí mění s časem, při proudění se ustálí rovnováha mezi konvekcí a molekulární difúzí. Korozi ovlivňují i vlastnosti žáruvzdorného materiálu. Kromě chemického a fázového složení, které ovlivňuje především na průběh chemických reakcí, jde zejména o kritéria hutnosti, které určují velikost styčné plochy pro reakci s taveninou. Kromě pórovitosti je důležitá i velikost pórů, jejich rozložení a vzájemné propojení. Větší a spojitě póry umožňují snadněji pronikání taveniny do keramického střepe. [13][14]

## 4 Zkoušky odolnosti proti korozi

Zkoušky odolnosti proti korozi se dělí do dvou skupin, na skupiny:

- dynamické,
- statické.

### 4.1 Statické metody

Jde o skupinu zkoušek, kde nedochází k vzájemnému nucenému pohybu mezi kapalinou a zkoušenou žárovzdorninou. Přirozená konvekce taveniny se tedy neuvažuje.

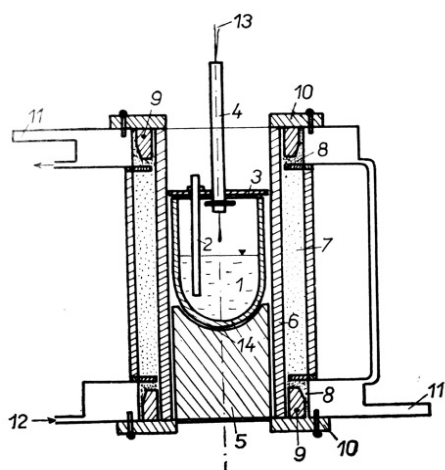
#### 4.1.1 Ponořovací metody

Ponořovací trámečková metoda. Při nejčastějším způsobu zkoušky odolnosti žárovzdorniny proti korozi se ponoří jeden nebo více vzorků do roztavené skloviny nebo strusky. Jako korozní prostředí se však používá též roztavený uhličitan sodný, síran sodný, siřičitan sodný apod.

Vzorky používané k těmto zkouškám jsou protáhlého tvaru, obvykle čtvercového nebo kruhového průřezu. Jejich rozměry se pohybují nejčastěji mezi 10 x 10 x 30 mm a 20 x 20 x 200 mm. Korozní zkoušky probíhají obvykle za vysokých teplot (1400 až 1500°C). Používají se však teploty podstatně nižší (100°C), popřípadě vyšší (až do 2000°C). Doby zkoušek se pohybují od několika minut až do několika dnů. Jinak jsou zkoušky velmi rozmanité a podmíněny různými faktory, především provozními podmínkami, při kterých se budou žárovzdorniny používat.

Velikost koroze vzorků se vyhodnocuje v podstatě třemi způsoby:

- Určením hloubky koroze (měřením tloušťky vzorků v původním stavu a po korozi);
- Měřením úbytku vzorku (vyjádřeného buď úbytkem hmotnosti, nebo objemu vzorku);
- Sledování vlastností a chemického složení média.

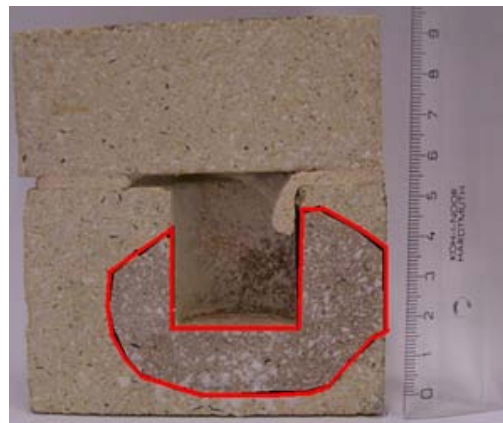
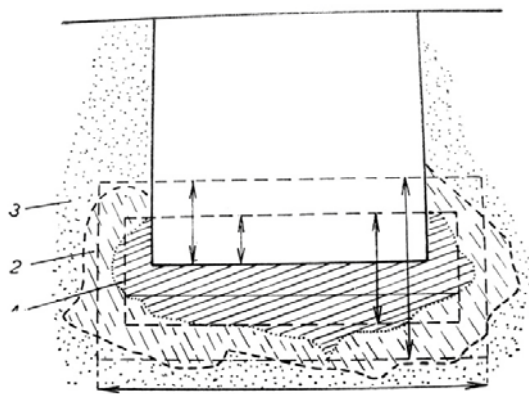


Obr. 6 Trámečková ponořovací statická metoda, vzorky po zkoušce

1 – struska, 2 – korodovaný trámeček, 3 – nosná korundová deska, 4 – korundová trubka, 5 – grafitový blok, 6 – grafitová topná trubka, 7 – hrubý kryptol, 8 - jemný kryptol, 9 – utěšňovací kroužek, 10 – příruba, 11 – přívody el. proudu, 12 – vodní chlazení, 13 – termočlánek, 14 – grafitový kelímek [17]

#### 4.1.2 Kelímková metoda

Při této zkoušce je možno ze sledovaného materiálu vytvarovat kelímek, ten se vypálí a naplní korozním médiem. Většinou se však odřízne příslušně velká část konvenčně vyráběné tvarovky, vyvrtá se do ní otvor, a do něho se naplní korodující činidlo. Otvor mívá obvykle průměr 45 až 50mm a hloubku 40 až 50mm. Teplota zkoušky se pohybuje mezi 1350 až 1500°C a výdrž činí 1 až 24hod. Přesné podmínky pro takovou zkoušku jsou normovány např. normou DIN 51069. Z normálky ze žárovzdorniny se odřízne část velikosti 80 x 80 a výšky 60mm a ve středu se odvrtá otvor o průměru 44mm a hloubky 45mm. Po odlomení jádra se dno otvoru zarovná a uhladí diamantovou frézou. Otvor se naplní určitým množstvím nadrcené strusky (např. 50g), zrnitosti < 0,4mm, popřípadě jiným korozním činidlem a zahřívá se v peci na zvolenou teplotu (1400 až 1500°C), s výdrží nejčastěji 2hod. Po zchladnutí se žárovzdornina rozřízne úhlopříčně přes střed otvoru. Vyhodnocuje se jednak zkorodovaná plocha řezu 1, jednak plocha nasáklá korozním médiem 2.

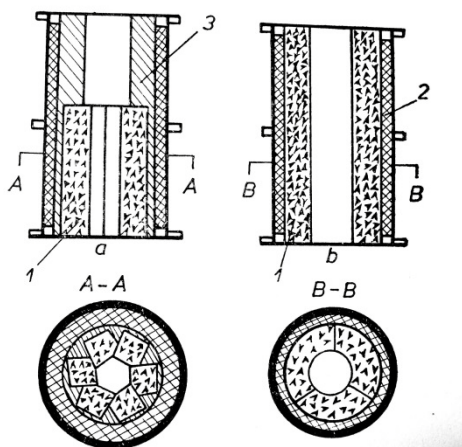


Obr. 7 Řez zkorodovaným kelímkem

1 – zkorodovaná plocha řezu, 2 – nasáklá plocha řezu, 3 – původní žárovzdornina [17]

### 4.1.3 Modelová pec

Zkouška probíhá buď tak, že se 6 kamenů sestaví do tvaru šestiúhelníku, nebo se z kruhových segmentů sestaví vyzdívka a takto vzniklá pec se naplní roztaveným surovým železem, popřípadě struskou. Koroze tvarovek se pak vyhodnotí po několika cyklech naplnění a dmýchání. Stupeň koroze se vyhodnotí tak, že se poměří hloubka koroze na několika charakteristických místech tvarovky a vypočte se příslušný průměr. Dále se zjišťuje odkorodovaný objem a to nejčastěji zasypaním vhodným materiálem do úrovně původní stěny a zjištěním objemu zásypu, což se nejsnáze provede vážením. Na řezu zkoušené tvarovky se pak hodnotí hloubka proniknutí taveniny.



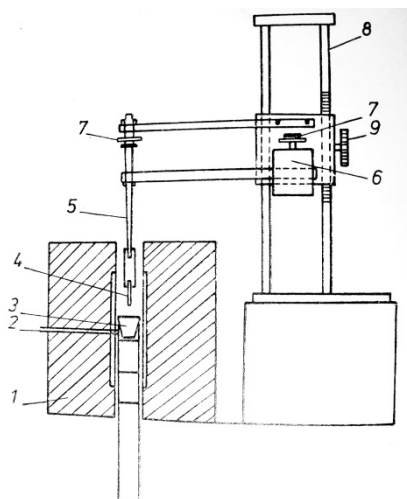
Obr. 8 Modelová metalurgická pec

1- zkoušená žárovzdornina, 2 – dolomit, 3 – výduska [17]

## 4.2 Dynamické metody

### 4.2.1 Ponořovací metody

Trámečková ponořovací metoda. Základem zkoušky je koroze jednoho nebo více vzorků ponořených do taveniny; vzorky při tom rotují. Ostatní podmínky bývají analogické statickým testům. Frekvence otáček se pohybuje od několika za minutu až do několika tisíc za minutu. Používá-li se několik vzorků současně, je frekvence otáček maximálně několik desítek za minutu. Je prokázáno, že hodnota koroze je úměrná druhé odmocnině z počtu otáček.



Obr. 9 Trámečková ponořovací dynamická metoda

1 – pec, 2 – termočlánek, 3 – platinový kelímek, 4 – vzorek, 5 – rotující držák vzorku, 6 – motorek, 7 – řemeničky, 8 – stojan, 9 – vertikální posun [17]

### 4.2.2 Kelímková metoda

Dynamické zkoušky se realizují tím, že se udělá ve dnu kelímku otvor a korozní médium se stále doplňuje. Koroze se vyhodnotí jednak na řezu kelímku, jak je uvedeno u statické zkoušky, jednak z rozšíření výtokového otvoru.

### 4.2.3 Modelová pec

Zkouška záleží ve zhotovení modelové vany malých rozměrů, v níž jsou stěny z bloků zkoumané žárovzdorniny. Tyto zkoušky se více blíží skutečnosti než analogické statické metody, protože lépe odpovídají skutečným podmínkám, tj. proudění, teplotním spádům apod.. Jsou však časově náročnější a nákladnější.



### **4.3 Zkoušky pro stanovení kyselinovzdornosti**

Normová zkouška představuje předpis, který stanovuje důležité parametry nebo vlastnosti materiálu, pracovního postupu, nebo samotného výrobku. Normy nejsou obecně závazné, smluvní strany však na ně mohou odkazovat při požadavcích na jakost výrobku.

#### **4.3.1 Výrobky tvarové hutné**

Pro stanovení kyselinovzdornosti žáruvzdorných výrobků v současnosti platí norma ČSN EN 993-16: Stanovení odolnosti proti kyselině sírové, kde se zkouší podrcený vzorek z tvarového výrobku. Je měřen hmotnostní úbytek po vaření v kyselině sírové.

Podle ČSN ISO 10080 se výsledná hodnota zatřídí do jedné ze tří skupin:

1. skupina - ztráta hmotnosti menší nebo rovna 2%,
2. skupina - ztráta hmotnosti větší než 2% a menší nebo rovna 4%,
3. skupina - ztráta hmotnosti je mezi 4 až 7%.

#### **4.3.2 Komínové vložky**

Další možná metoda je popsána v normě ČSN EN 1457-1 pro zkoušení komínových vložek.

Provádí se na zkušebních tělesech o přibližných rozměrech 65x65x12mm (plocha 4100 mm<sup>2</sup>), pracuje se s kyselinou sírovou, která je ve vodní lázni zahřívána mírně vroucí vodou. Následně je zkušební těleso promýváno vroucí destilovanou vodou, až voda nevykazuje známky přítomnosti kyseliny sírové. Náročnost promývání je však velmi vysoká – obvykle je potřeba až 100 cyklů, což odpovídá 50 hodinám promývání. Vzorek jinak vykazuje hmotnostní příbytky, jelikož kyselina sírová uzavřená v pórech má vysokou objemovou hmotnost (1,610 kg.m<sup>-3</sup>).

Spojovacím materiálem komínových tvarovek je malta, její kyselinovzdornost se stanoví podle normy ČSN EN 13063-2, a tustejným způsobem, jako u komínkových tvarovek. Postup se liší ve tvaru zkušebního tělesa, které se nechá vytvrdit ve zkušební válečky.

#### **4.3.3 Křemičité sklo**

Další možná metoda vychází z normy ČSN 70 0532-1 pro zkoušení křemičitého skla. Vzorek o velikosti 45x45x2 mm (plocha 30 až 40 cm<sup>2</sup>) se vystaví působení kyselině fluorovodíkové a koncentraci 6 mol/l, ve které je po dobu 3 hodin vystaven varu. Odolnost se stanoví

vyjádřením obsahu oxidu sodného, ve výluhu plamenovým emisím nebo atomově absorpčním spektrofotometrem a vztahuje ke  $\mu\text{m}/100\text{ cm}^2$  plochy. Výsledné hodnoty se zatřídí do tříd:

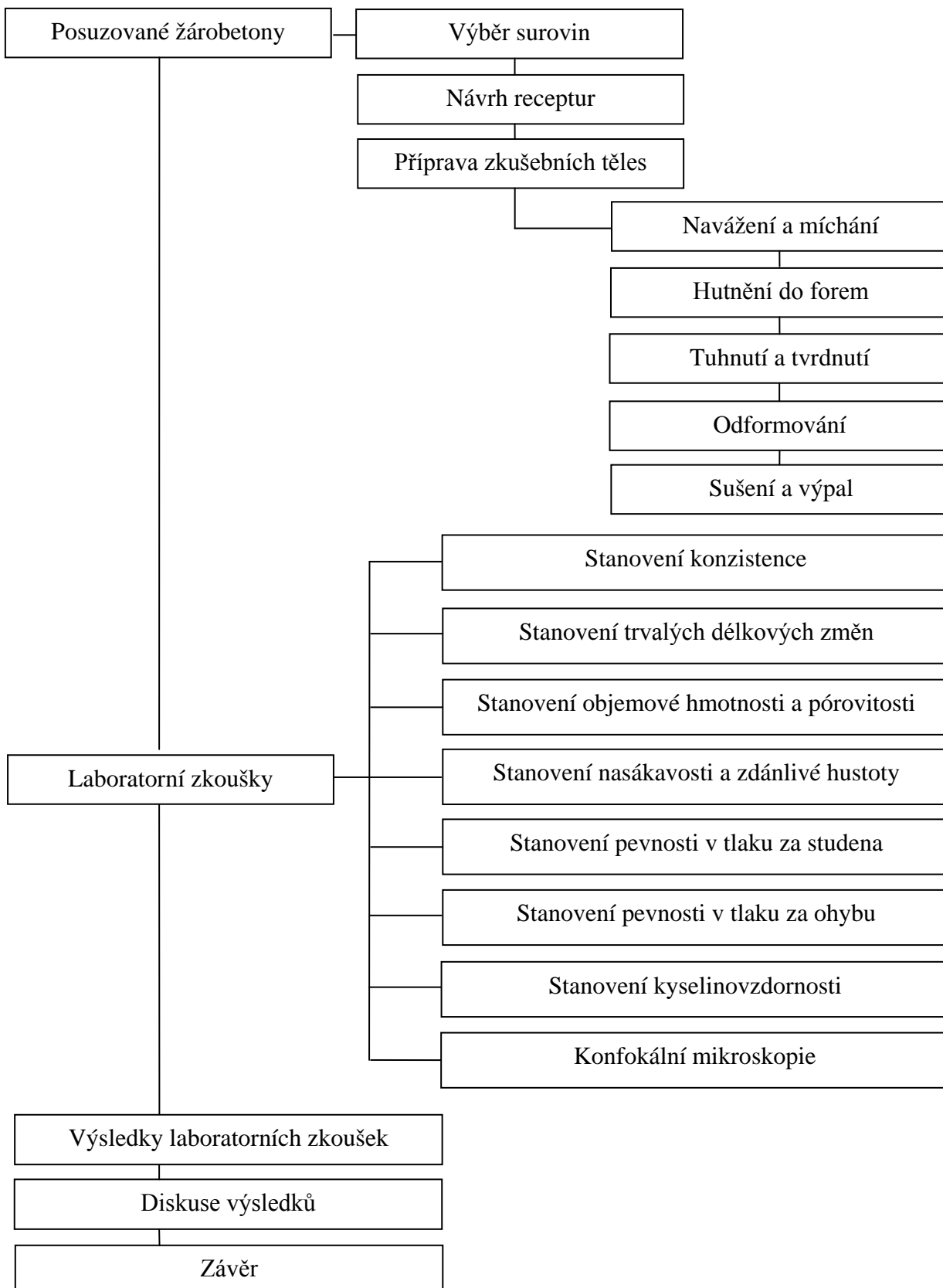
1. třída – celkový obsah oxidu sodného menší 50
2. třída - celkový obsah oxidu sodného do 150
3. třída - celkový obsah oxidu sodného nad 150

#### **4.3.4 Užitkový porcelán**

Stanovení kyselinovzdornosti vizuálně je popsáno v normě 72 5523 Stanovení kyselinovzdornosti užitkového porcelánu. Metoda spočívá v určení vlivu čtyřprocentního roztoku kyseliny octové při pokojové teplotě na dekorovaný vzorek. Kyselina octová ledová ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) o hustotě  $1,05\text{ g/cm}^3$  se nechá v klidu působit 24 hodin. Pokud není zřejmá žádná změna barevného odstínu a vzhledu, výrobek je považován za kyselinovzdorný.

## II. Praktická část

### 1 Metodika řešení prováděných prací



## 2 Posuzované žárobetony

Posuzovány byly žárobetony lišící se množstvím hlinitanového cementu. Dalším rozdílem je použití různých druhů přísad.

Pro zkoušky byly také navrženy receptury i pro žárobetony s chemickou vazbou, kde byl hlinitanový cement úplně nahrazen. Byla tak posuzována celá škála druhů žárobetonů, které se praxi používají, avšak odolnost proti působení kyselin na nich nebyla detailněji zkoumána.

Bylo navrženo následujících šest receptur:

- Žárobetony běžné (dále značené DC)
- Žárobetony se středním obsahem cementu (dále značené MC)
- Žárobetony s nízkým obsahem cementu (dále značené LC)
- Žárobetony s vazbou Sol-SiO<sub>2</sub> (dále značené SC)
- Žárobetony s fosfátovou vazbou (dále značené PC)
- Žárobetony s vodním sklem (dále značené HC)

### 2.1 Použité suroviny

#### 2.1.1 Plnivo

Pro posuzované žárobetony byl jako kamenivo vybrán pálený kaolin, který pro aplikaci do chemicky agresivního prostředí vykazoval nejlepší výsledky ze zkoušek kyselinovzdornosti. Hodnoty uvedené v tabulce vycházejí ze zkoušek prováděných v rámci moji bakalářské práce. Pálený kaolín má vynikající objemovou stálost, obsahuje velmi malé množství nežádoucích oxidů. Dodavatelem zkoušeného kameniva je Sedlecký kaolin a.s. Božíčany.

Kaolín patří do skupiny jílových minerálů, u kterých se vyskytuje chemicky vázaná strukturní voda. Povahou je měkká, bílá zemina, jejíž základní složkou je nerost kaolinit- $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Vznikl nejčastěji hydrotermálními pochody z různých hornin bohatých na živce. Ložiska jsou soustředěna do oblasti výskytu živcových hornin, ve kterých proběhla kaolinizace. Pro žárové použití je nutné kaolín vyžít, tímto výpalem si zachová bílou barvu a proběhnou mineralogické přeměny. Převážnou složkou se tak stane Mulit a skelná fáze. V České republice se velmi kvalitní kaolin nachází a těží v okolí Karlových Varů, Plzně, Kadaně a Podbořan.

Název kameniva	Ztráta [%]
Pálený kaolin	1,30
Andalusit	2,77
Mullit	3,62
Tabulární Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,63
Korund	4,84
Lupek D	6,88
Bauxit	7,22
Lupek A	7,29
Cordierit	38,32
Vermicullit	52,10
Olivín	79,85

Tabulka 5. Kyselinovzdornost kameniv

Jako mikroplnivo byl u zkoušených žárobetonů použit jemně mletý šamot, mikrosilika a reaktivní oxid hlinitý. Tyto u běžných betonů slouží jako filery. U šamotu konkrétně šlo o Lupek A ze společnosti České lupkové závody a.s. Nové Strašecí. Mikrosilika zlepšuje hutnost a počátení i konečné pevnosti žárobetonu. Jejím výrobcem je společnost Elkem AS z Norska. Reaktivní oxid hlinitý vyrábí společnost Nabaltec AG z Německa.

### 2.1.2 Pojivo

U hydraulicky pojených receptur byl použit hlinitanový cement SECAR 71 s deklarovaným obsahem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 71%. Tento cement se vyrábí v Chesapeake ve Virginii, USA, v Le Teil, Francie, ve West Thurrock, Anglie a v Tianjin, Číně. Jeho výhodou je vysoká čistota, bílá barva, bez přítomnosti přísad či aditiv jako oxidů hlinitých. Slínek tohoto cementu se připravuje reakcí v pevné fázi s mineralogickou kontrolou. Měrný povrch po mletí je 4000 cm<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> podle Blaina. Primární mineralogickou fází je CA a sekundární pak CA<sub>2</sub>. Secar propůjčuje vynikající mechanickou pevnost a betonů a je vhodný pro komplikovanější aplikace ztekucených systémů (LCC, ULCC), které v současné době převládají v odvětví žáruvzdorných materiálů.

U žárobetonů pojených vazbou Sol-SiO<sub>2</sub> gel bylo použito tekutého roztoku obchodního názvu REFRAFIX. Je to 40% roztok koloidního oxidu křemičitého s kulovým tvarem zrn. Průměrný průměr částic je 12nm. Povrch zrn pokrývají silanolové skupiny s

negativním nábojem. Tyto částice jsou velmi hydrofilní a zůstávají ve stabilní suspenzi s vodou po dlouhou dobu. Roztok je transparentní a bez zápachu.

Žárovbetony s fosfátovou vazbou byly pojeny roztokem fosforečnanu hlinitého od výrobce BRENNTAG Nederland BV, produkt se prodává pod značkou FFB 705. Tento roztok díky svým kyselým vlastnostem reaguje při nižším rozmezí teplot se surovinami neutralizací. Při teplotách nad 200°C dochází k dalšímu pojení díky tvorbě polymerických fosfátů. Díky tomu výrobky pojené FFB705 dosahují vysokých pevností při relativně nízkých teplotách. Fosfátová vazba přetrvává až do teplot, kdy vzniká vazba keramická.

Pojení vodním sklem vnáší do žárobetonu alkálie, tedy snižuje jejich teplotu použití. Výhodou je však tvorba vazby již za pokojových teplot a vynikající chemická odolnost. Žárovbetony s vazbou na bázi vodního skla byly pojeny roztokem vodního skla od výrobce Vodní sklo a.s. Praha. Roztok obsahuje cca 36% sušiny je čirý, slabě zakalený s alkalickou reakcí neomezeně mísitelný s vodou.

### 2.1.3 Přísady

Byl použit regulátor tuhnutí a to komplexní dispergační přísada. Jedná se o průmyslově vyráběnou směs, která ztekucuje, zároveň urychluje nebo zpomaluje tuhnutí a slouží zároveň jako plastifikátor. MADS se používá v letních měsících jako zpomalovač tuhnutí, v zimních měsících se používá MADW, který směs naopak urychluje. Distribuci provádí firma Almatiss GmbH, v Německu.

Další použitou přísadou byl FFB 753, což je tvrdidlo pro žáromateriály pojené kyselým fosforečnanem hlinitým. Přípravek obsahuje anorganické křemičitany a oxidy, naopak neobsahuje alkalické sloučeniny. FFB 753 reaguje při teplotě prostředí s kyselými pojivy na bázi kyselého fosforečnanu hlinitého

## 2.2 Složení navržených žárobetonových směsí

Surovina	Podíl [%]	Hmotnost podílu [kg]	Zrnitost [mm]
Pálený kaolín	70	7	0 - 6
Jemně mletý šamot	10	1	0 - 0,01
Hlinitanový cement 71%	20	2	
Σ	100	10	

Tabulka 6. Složení žárobetonové směsi DC

Surovina	Podíl [%]	Hmotnost podílu [kg]	Zrnitost [mm]
Pálený kaolin	65	6,5	0 - 6
Jemně mletý šamot	10	1	0 - 0,01
Hlinitanový cement 71%	12	1,2	
Reaktivní oxid hlinitý	8	0,8	
Mikrosilika	4	0,4	
MADS	1	0,1	
Σ	100	10	

Tabulka 7. Složení žárobetonové směsi MC

Surovina	Podíl [%]	Hmotnost podílu [kg]	Zrnitost [mm]
Pálený kaolin	65	6,5	0 - 6
Jemně mletý šamot	14	1,4	0 - 0,01
Hlinitanový cement 71%	5	0,5	
Reaktivní oxid hlinitý	10	1	
Mikrosilika	5	0,5	
MADS	1	0,1	
Σ	100	10	

Tabulka 8. Složení žárobetonové směsi LC

Surovina	Podíl [%]	Hmotnost podílu [kg]	Zrnitost [mm]
Pálený kaolin	64,69	7	0 - 6
Jemně mletý šamot	27,35	2,96	0 - 0,01
BM moučka (MgO)	0,37	0,04	
Koloidní SiO <sub>2</sub>	7,59	0,822	
Σ	100	10,822	

Tabulka 9. Složení žárobetonové směsi SC

Surovina	Podíl [%]	Hmotnost podílu [kg]	Zrnitost [mm]
Pálený kaolin	69,48	7	0 - 6
Jemně mletý šamot	25,81	2,6	0 - 0,01
Ztekučovací FBB 753	3,97	0,4	
Pojivo fosfátové FBB 705	0,74	0,075	
Σ	100	10,075	

Tabulka 10. Složení žárobetonové směsi PC

Surovina	Podíl [%]	Hmotnost podílu [kg]	Zrnitost [mm]
Pálený kaolin	65,26	7	0 - 6
Jemně mletý šamot	24,24	2,6	0 - 0,01
Vodní sklo	6,77	0,726	
Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	3,73	0,4	
Σ	100	10,726	

Tabulka 11. Složení žárobetonové směsi HC



Obr. 10 Použité frakce páleného kaolinu, mikromleté Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, hlinitan. cement Secar 71

### 2.3 Příprava zkušebních těles

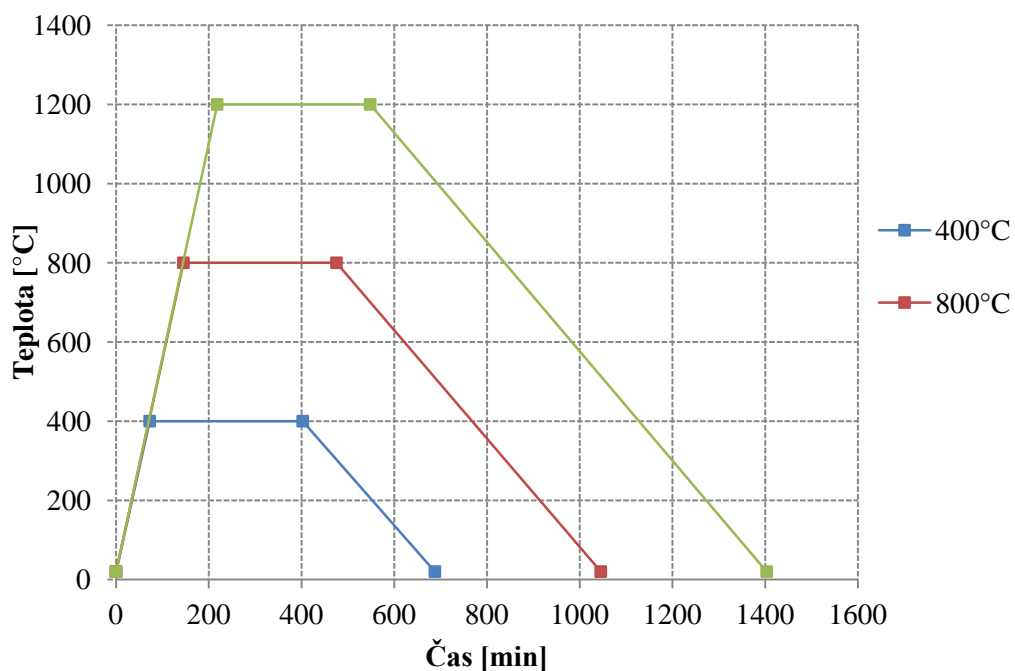
Nejprve byly přesně naváženy jednotlivé složky žárobetonových směsí dle výše uvedených receptur. Každá směs byla vsypána do mechanického mísiče a po částečném promíchání za sucha byla přidávána voda nebo jiné tekuté činidlo.

Dále byla žárobetonová směs uložena do forem a z vibrována. Z jednoho typu záměsi byly vždy vyrobeny 4 kvádry o rozměrech 160x40x40 mm. Formy byly ponechány 24 hodin překryté igelitovou fólií v laboratoři. Po odformování byla jednotlivá zkušební tělesa označena žáruvzdornou barvou pro pozdější identifikaci.

Před výpalem byla zkušební tělesa změřena a zvážena ve vysušeném stavu. Jedna záměs byla zkoušena ve vysušeném stavu ( $\pm 110$  °C). Zbylé tři záměsi byly vypáleny na



požadované teploty 400, 800, 1200 a to v elektrické superkantalové peci Clasic CZ. Nárůst teploty při výpalu byl lineární 5,5°C za minutu, výdrž na teplotě byla zadána na 5 hodin. Chladnutí bylo pozvolné a samovolné. Po výpalu byla opět zkušební tělesa změřena pro stanovení trvalých délkových změn. Následně byly na vzorcích provedeny zkoušky dle uvedené metodiky.



Obr. 11 Pálicí křivky, pálicí pec Clasic



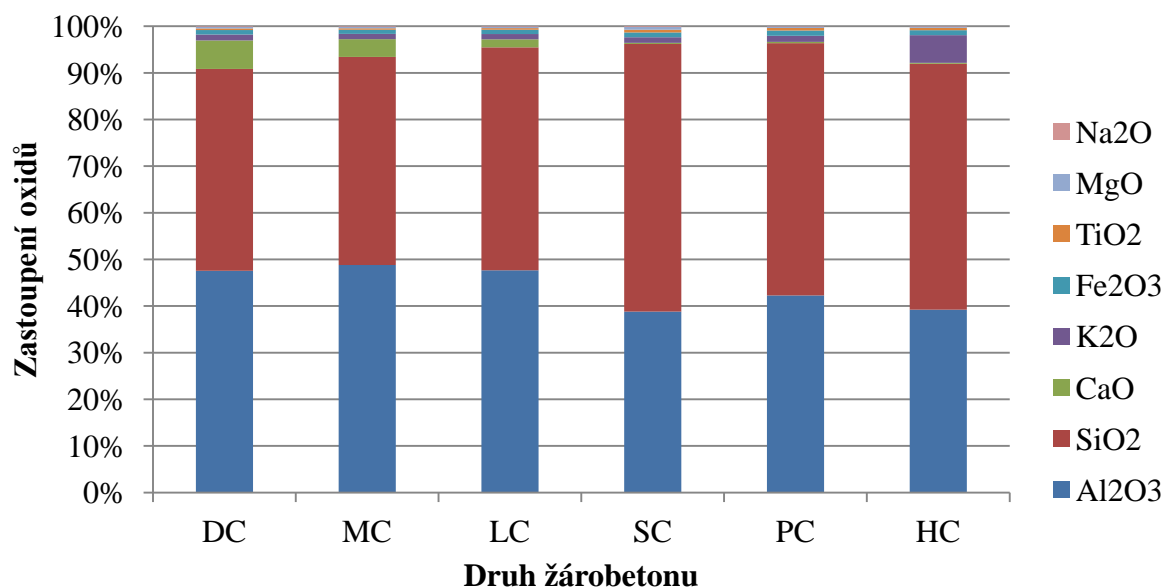
Obr. 12 Zkušební vzorky po vysušení, vypálené na 400, 800 a 1200°C

## 2.4 Chemické složení

Chemické složení žárobetonů bylo stanoveno výpočtem. Podkladem pro tento výpočet byly katalogové listy dodavatelů materiálů a jednotlivé navržené receptury žárobetonů. Poměr nejvíce zastoupených oxidů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$ ) je u hydraulicky pojených žárobetonů vyrovnaný, u chemicky pojených je pak převažujícím oxidem  $\text{SiO}_2$ .

Název	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$
DC	47,56	43,27	6,13	1,28	0,94	0,37	0,33	0,13
MC	48,81	44,62	3,79	1,15	0,87	0,33	0,28	0,14
LC	47,67	47,81	1,73	1,13	0,91	0,37	0,25	0,13
SC	38,82	57,39	0,24	1,18	1,06	0,55	0,60	0,16
PC	42,27	54,12	0,25	1,30	1,14	0,56	0,27	0,09
HC	39,22	52,71	0,24	5,91	1,06	0,53	0,25	0,08

Obr. 13 Chemické složení zkoušených žárobetonů



Obr. 14 Zastoupení oxidů ve zkoumaných žárobetonech

### 3 Laboratorní zkoušky

Termíny a technické názvosloví použité v praktické části vyplývá z platných norem. Zkušebním tělesem se chápe žárobetonové těleso, které bylo zhotovené za účelem dané zkoušky, jeho tvar a rozměr je přesně daný typem zkoušky a je vždy přesně u konkrétní zkoušky popsán.

Příprava zkušebních těles probíhala ve společnosti Průmyslová keramika, spol. s r.o. z důvodů potřebného vybavení a surovin. Sušení, výpal a všechny zkoušky pak byly provedeny v laboratořích Vysokého učení technického v Brně. Stanoveny byly následující fyzikální vlastnosti:

- Konzistence každé směsi
- Trvalé délkové změny na zkušebních tělesech vypálených na teploty 400, 800 a 1200°C
- Kriteria hutnosti
- Pevnost v tlaku za studena na zkušebních tělesech vysušených při 110°C a vypálených na teploty 400, 800 a 1200°C
- Pevnost v tlaku za ohybu na zkušebních tělesech vysušených při 110°C a vypálených na teploty 400, 800 a 1200°C
- Kyselinovzdornost
- Sledování tvaru povrchu u vybraných receptur na základě výsledků kyselinovzdornosti, tedy u teplot 800 a 1200°C

V kapitole Výsledky jsou uvedeny výsledky v průměrných hodnotách kvůli rychlejší orientaci a přehlednosti.

#### 3.1 Stanovení konzistence

Konzistence byla stanovena před uložením směsí do forem a následující vibrací. Postup byl proveden podle normy ČSN EN 1402 – 4.

Lehce naolejovaná forma výšky 50mm byla připevněna na horní plochu vibračního stolu, její větší průměr byl dole. Žárobetonovou směsí byla forma naplněna mírně přes horní okraj, nejpozději do 30 sekund. Následovalo zapnutí vibračního stolu, zaplnění formy a odstranění přebytečného obsahu zednickou lžící. Po 30 sekundách byla ukončena vibrace a

forma byla sejmuta pohybem kolmo vzhůru, aby nedošlo k deformaci kónického tvaru. Směs se po dobu 2 minut volně roztékala a následně byl posuvným měřítkem dva navzájem kolmé průměry změřen poloměr rozteklého vzorku. Zaznamenala se doba od počátku přidavku vody, průměrná hodnota z obou měření a určen střední průměr  $d_{aver}$ .

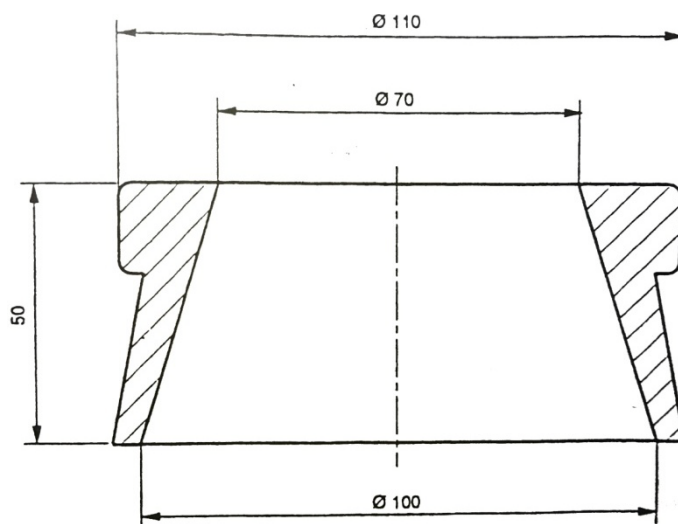
Hodnota roztékavosti  $F_v$ , udávána v % se vypočte podle následující rovnice:

$$F_v = \frac{d - d_0}{d_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Kde:

$d$  ... je střední průměr rozteklého vzorku [mm]

$d_0$  ... původní spodní průměr [mm]



Obr. 15 Ocelová forma pro stanovení konzistence



Obr. 16 Stanovení konzistence po roztečení kužele

### 3.2 Stanovení trvalých délkových změn

K délkovému měření byla použita digitální posuvná měřidla, která umožnila měřit délky zkušebních těles s přesností  $\pm 0,1$  mm. Trvalé délkové změny poté udávají změnu délek stanovených po vysušení  $L_1$  a po výpalu  $L_t$ . Změna délky výpalem se stanoví podle následujícího vzorce:

$$L_f = \frac{L_t - L_1}{L_1} \cdot 100 [\%]$$

Kde:

$L_1$  ... je hmotnost vorku po zkoušce nasákavosti [g]

$L_t$  ... hmotnost vysušeného vzorku [g]

### 3.3 Stanovení objemové hmotnosti a zdánlivé pórovitosti

Objemová hmotnost udává hmotnost objemové jednotky vysušeného vzorku včetně uzavřených a otevřených pórů. Vyjadřuje se v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , zpravidla hydrostatickým vážením.

Vzorky nasycené při zkoušce nasákavosti se potom hydrostaticky zvažily na vytárovaném závěsu.

Výpočet se provádí podle vztahu:

$$OH = \frac{m_s}{m_n - m_{nv}} \cdot \rho_v [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$$

Kde:

$m_s$  ... je hmotnost vysušeného vzorku [g]

$m_n$  ... hmotnost nasáklého vzorku váženého na vzduchu [g]

$m_{nv}$ ...hmotnost nasáklého vzorku váženého hydrostaticky [g]

$\rho_v$ ...hustota kapaliny hydrostatického vážení [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] [16]

Zdánlivá pórovitost udává, jaký je poměr objemu otevřených pórů vzorku k jeho celkovému objemu včetně pórů, je přesnějším určením pórovitosti mikrostruktury, než nasákavost.

Vyjádření v procentech podle vzorce:

$$PZ = \frac{m_n - m_s}{m_n - m'_n} \cdot 100 [\%]$$

Kde:

$m_n$  ... je hmotnost nasáklého vzorku, v gramech;

$m_s$ ...hmotnost nasáklého vzorku váženého hydrostaticky, v gramech;

$m'_n$  ... je hmotnost nasáklého vzorku pod vodou, v gramech;

$\rho_v$ ...hustota kapaliny hydrostatického vážení, v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . [16]

### 3.4 Stanovení nasákavosti a zdánlivé hustoty

Nasákavost je schopnost materiálu přijímat kapalinu. Charakterizuje mikrostrukturu materiálu, konkrétně jeho pórovitou strukturu. Vysoká hodnota odpovídá pórovité struktuře, zatímco hutný materiál má hodnotu nízkou. Stanovuje se v procentech, jako poměr hmotnosti vody pohlcené zkušebním vzorkem ke hmotnosti vysušeného vzorku, obvykle za podmínek stanovených normou, vzorec:

$$N = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 [\%]$$

Kde:

$m_n$  ... je hmotnost vorku po zkoušce nasákavosti, v gramech;

$m_s$  ... hmotnost vysušeného vzorku, v gramech. [16]

Při zkoušce byla nasákavost stanovena vakuovým způsobem, kdy byl vysušené a zvážené vzorky vloženy do vakuační nádoby, ze které byl následně odčerpán vzduch až po dosažení tlaku 8 mbar, který se udržoval po dobu 15 minut. Potom se do nádoby přivedla pomocí vakuační pupmy destilovaná voda tak, aby během 3 minut byly všechny vzorky touto vodou zcela překryty. Takto se vzorky ponechaly 30 minut. Dále byly vzorky otřeny hadříkem a zváženy.

Zdánlivá hustota udává hmotnost vysušeného vzorku na jednotku jeho objemu včetně uzavřených pórů. Pokud vzorek nemá uzavřené póry, pak se zdánlivá hustota rovná měrné hmotnosti (hustotě)

Vyjádření v procentech podle vzorce:

$$ZH = \frac{m_s}{m_s - m_{nv}} \cdot \rho_v [\%]$$

Kde:

$m_s$  ... je hmotnost vysušeného vzorku, v gramech;

$m_{nv}$ ...hmotnost nasáklého vzorku váženého hydrostaticky, v gramech;

$\rho_v$ ...hustota kapaliny hydrostatického vážení, v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . [16]

### 3.5 Stanovení pevnosti v tlaku za studena

Pevnost v tlaku byla vypočtena jako maximální zatížení na plochu, kterému žárobeton odolává, aniž by došlo k jeho porušení. Tuto zkoušku popisuje EN 993-5. Při stanovení pevnosti v tlaku byly zkušební tělesa – trámečky 160x40x40 mm vystaveny rovnoměrně se zvyšujícím tlaku až do jejich porušení. Pevnost v tlaku pak byla vypočítána dle vztahu:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \quad [N \cdot mm^{-2}]$$

Kde:

$F_{max}$ ... je maximální zatížení při porušení zk. tělesa [N]

A ... obsah tlačné plochy [ $\text{mm}^2$ ]

### 3.6 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu za studena

Platí, že pevnost v tahu za ohybu je největší zatížení, které vydrží hranolovité zkušební těleso daných rozměrů, pokud je ohýbáno v třibodovém uspořádání. Pevnost v tahu za ohybu pak byla vypočtena dle vztahu:

$$\sigma_F = \frac{3 F_{max} \cdot L_s}{2 b \cdot h^2} \quad [N \cdot mm^{-2}]$$

Kde:

$F_{max}$ ... je maximální zatížení při porušení zk. tělesa [N]

$L_s$ ...je vzdálenost podpor tělesa [mm]

b ... je šířka zkušební tělesa [mm]

h...výška zkušební tělesa [mm]

### 3.7 Stanovení odolnosti proti kyselině sírové

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 993-16 : Zkušební metody pro žáruvzdorné výrobky tvarové hutné – Část 16: Stanovení odolnosti proti kyselině sírové

Předepsaným způsobem rozmělněný vzorek, byl vystaven účinku vroucí 70% (hmotnostně) kyseliny sírové po dobu šesti hodin; zjistil se úbytek jeho hmotnosti a vyjádřil se v procentech původní hmotnosti vysušeného vzorku.

Pro zkoušku je dána zrnitost 0,80 – 0,63 mm, navážka přibližně 20g s přesností 0,001g. Vzorek byl přesypán do kulaté baňky a přilije 200ml kyseliny sírové. Obsah baňky byl následně uveden v topném hnízdě během asi 30 minut do varu. Udržování mírného varu je stanoveno na dobu 6 hodin.

Po 1 hodinovém chladnutí byla čirá kyselina nad vzorkem slita do výlevky a vzorek přelit 500ml destilované vody. Celý obsah baňky byl spláchnut do předem vysušeného a s přesností na 0,001 g zváženého porcelánového kelímku (frity) a vakuově odfiltrován. Zbytek ve filtračním kelímku se promýval destilovanou vodou, až filtrát po přidání několika kapek chloridu barnatého zůstal čirý.

Filtrační kelímek se vzorkem se následně vysušil v sušárně do ustálené hmotnosti. Kelímek s obsahem po vychladnutí byl zvážen s přesností na 0,001 g. Dále se odečetla hmotnost kelímku taky, aby se získala hmotnost zbytku  $m_2$

Vyhodnocení výsledků – úbytek vzorku  $L$  vyjádřený v poměru k původní hmotnosti:

$$L = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Kde:

$m_1$  ... je původní hmotnost vzorku [g]

$m_2$  ... hmotnost zbytku [g] [15]

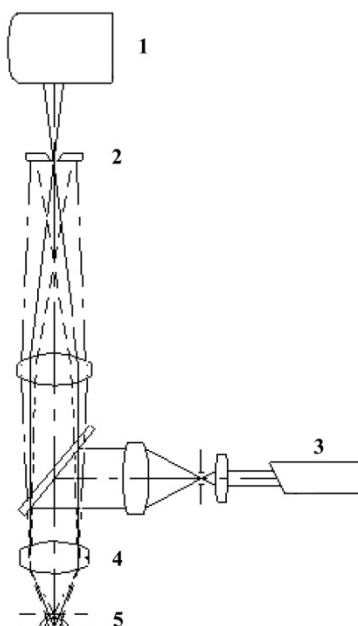
### 3.8 Konfokální mikroskopie

Měření bylo provedeno na přístroji Olympus Lext OLS300. Tento přístroj je typ rastrovacího konfokálního laserového mikroskopu s vysokým rozlišením, vysokým kontrastem a se zvýšeným rozlišením díky použití konfokální optiky. Pořizuje 2D obrazy a 3D obrazy (plošný obraz a výškový obraz) a zlepšuje kvalitu pořízeného obrazu. Dále je schopen měřit šířku čáry a profil výškového rozdílu za různých režimů zobrazení.

Laserový mikroskop rastrovacího typu zaměřuje svým objektivem laserový paprsek na velmi malý bod a pohybuje jím po vzorku ve směru X-Y. Poté detektorem zachycuje světlo od vzorku a vysílá obraz vzorku na monitor. U konfokální optiky je v místě, které je opticky sdružené s polohou zaostření (v konfokální rovině) umístěna clona s dírkou, která odstraňuje světlo přicházející z míst mimo polohu zaostření. Díky tomu se část, kde bylo světlo



odstraněno, na vzorku zcela zatemní a je možné prostorový vzorek rozdělit na optické řezy. Naproti tomu v běžném mikroskopu se světlo přicházející z jiných částí překrývá se světlem tvořícím obraz v rovině zaostření a celý obraz se tím rozmazává.



Obr. 17 Konfokální mikroskop

1- světelný snímač, 2 - dírková clona, 3- laser, 4- objektiv, 5- vzorek

### 3.8.1 Tvar povrchu

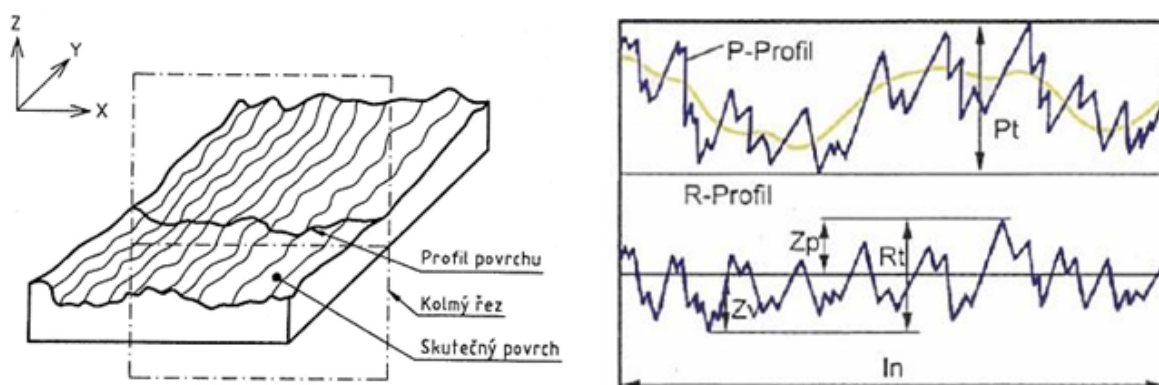
Norma ČSN EN ISO 4287 definuje následující geometrické parametry:

P - parametr- parametr vypočítaný ze základního profilu

R - parametr- parametr vypočtený z profilu drsnosti

drsnost povrchu - složka struktury povrchu s nejmenší roztečí nerovností

základní profil - složka struktury povrchu s největší roztečí nerovností

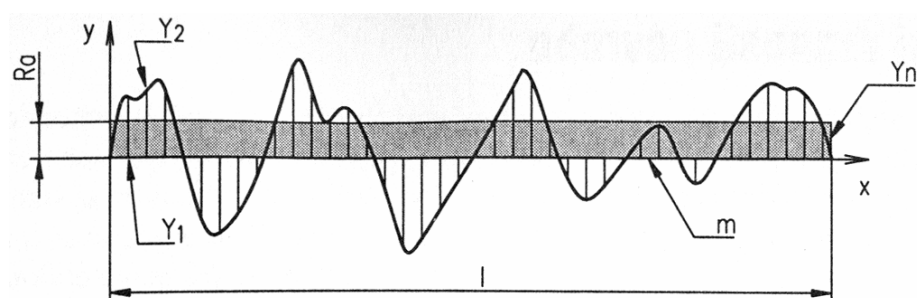


Obr. 18 Schematické znázornění pojmů tvaru povrchu

### 3.8.2 Střední aritmetická výška drsnosti

Nazývá se též „Střední aritmetická úchylka“ a příslušnou normou (ČSN EN ISO 4287) je definována jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Y(x)$  v rozsahu základní délky. Je určena výpočtem z rovnice:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \left( \frac{|y_1| + |y_2| + |y_3| + \dots + |y_n|}{n} \right) [\mu\text{m}]$$

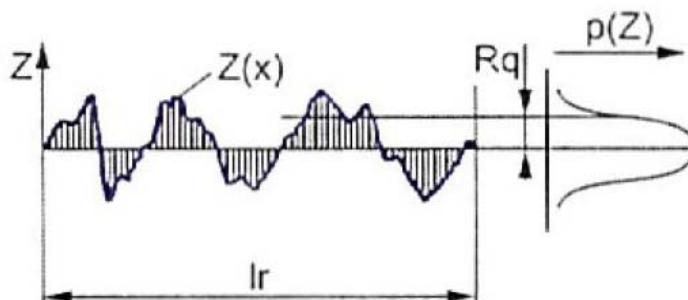


Obr. 19 Schematické znázornění střední aritmetické výšky drsnosti

### 3.8.3 Střední kvadratická výška drsnosti

Střední kvadratická hodnota drsnosti  $Rq$  je dána vztahem:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} [\mu\text{m}]$$

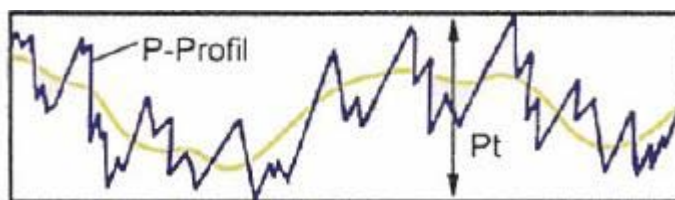


Obr. 20 Schematické znázornění střední kvadratické hodnoty drsnosti

### 3.8.4 Aritmetická střední výška zakřivené plochy profilu

Střední aritmetická drsnost plochy je určena výpočtem z rovnice:

$$Pa = \frac{1}{LM} \int_0^M \int_0^L |F(x, y)| dx dy \quad [\mu\text{m}]$$



Obr. 20 Schematické znázornění aritmetické střední výšky zakřivené plochy profilu

### 3.8.5 Stanovení tvaru povrchu

Na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT OLS3000 byla naměřena data ze čtyř vzorků vybraných žárobetonů.

Tyto vzorky byly změřeny před degradačním procesem (6 hodinový var v 70% kyselině sírové) a následně po tomto procesu.

Z pěti naměřených veličin byl vypočten aritmetický průměr. Podle vzorce byla stanovena procentuální změna parametrů:

$$x = \left( \frac{S_z - S_r}{S_r} \right) \times 100 \quad [\%]$$

Kde:

$S_z$  ... parametr po degradaci, jednotka [ $\mu\text{m}$ ]

$S_r$  ... parametr referenčního vzorku, jednotka [ $\mu\text{m}$ ]

Tímto lze porovnat procentuální změnu těchto vybraných parametrů, ze kterých je následně stanoven průměr:

**Pa** – Aritmetická střední výška zakřivené plochy profilu

**Pq** – Střední kvadratická drsnost

**Ra** – Aritmetická střední výška drsnosti

**Rq** – Střední kvadratická výška zakřivené plochy profilu

## 4 Výsledky laboratorních zkoušek

### 4.1 Konzistence

Zkouška byla provedena vždy u každé směsi ihned po zamíchání před uložením do forem a vibrováním.

Druh žárobetonové směsi	DC	MC	LC	SC	PC	HC
Střední průměr $d_{\text{Aver}}$ [mm]	221	290	260	270	212	240
Roztékání $F_v$ [%]	121	190	160	170	112	140
Množství vody [ $\text{l.kg}^{-1}$ ]	10,5	7	6,2	12,32	9,75	12,9

Tabulka 12. Roztékání a množství vody na 100kg suché žárobetonové směsi

### 4.2 Trvalé délkové změny

Byly zjišťovány u všech těles vypálených na požadované teploty

Typ žárobetonové směsi	[%]	Typ žárobetonové směsi	[%]
DC400	0,04	SC400	0,78
DC800	-1,45	SC800	0,50
DC1200	-0,62	SC1200	-1,01
MC400	0,23	PC400	1,26
MC800	-0,55	PC800	0,84
MC1200	-0,56	PC1200	-1,28
LC400	0,21	HC400	-0,35
LC800	0,51	HC800	-0,03
LC1200	-0,32	HC1200	-0,20

Tabulka 13. Trvalé délkové změny

Typ žárobetonové směsi	[%]	Typ žárobetonové směsi	[%]
DC400	4,38	SC400	0,05
DC800	5,81	SC800	0,52
DC1200	6,51	SC1200	0,73
MC400	3,91	PC400	1,04
MC800	2,76	PC800	1,58
MC1200	3,34	PC1200	1,72
LC400	1,33	HC400	0,44
LC800	1,65	HC800	0,89
LC1200	1,88	HC1200	1,05

Tabulka 14. Hmotnostní ztráta žíháním

### 4.3 Kriteria hutnosti

Ke kritériím hutnosti patří objemová hmotnost, zdánlivá pórovitost, nasákavost a zdánlivá hustota. Tyto vlastnosti byly stanoveny na vzorcích po vysušení i na vzorcích po vypálení. Výsledná hodnota je průměrem z měření ze tří vzorků.

Typ žárobetonové směsi	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Zdánlivá pórovitost [%]	Nasákavost [%]	Zdánlivá hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]
DC110	2200	11,99	5,44	2505,25
DC400	2180	17,67	8,10	2648,23
DC800	2090	21,06	10,08	2646,12
DC1200	2090	21,37	10,25	2650,84
MC110	2350	10,93	4,66	2632,97
MC400	2320	14,35	6,19	2707,05
MC800	2230	16,54	7,42	2672,96
MC1200	2240	17,25	7,72	2701,57
LC110	2340	10,07	4,31	2599,69
LC400	2370	11,94	5,04	2692,12
LC800	2300	12,99	5,63	2648,85
LC1200	2300	14,09	6,13	2675,43
SC110	2140	17,78	8,31	2601,25
SC400	2150	18,05	8,39	2626,26
SC800	2090	18,69	8,92	2575,08
SC1200	2110	18,64	8,85	2588,79
PC110	2110	18,56	8,80	2589,74
PC400	2080	20,81	10,03	2621,81
PC800	2010	21,68	10,77	2569,94
PC1200	2070	18,49	8,95	2533,23
HC110	2080	18,25	8,80	2537,41
HC400	2070	18,59	9,00	2537,83
HC800	1990	20,32	10,20	2500,17
HC1200	2100	15,77	7,52	2488,13

Tabulka 15. Kriteria hutnosti

## 4.4 Pevnostní charakteristiky

Pevnost v tlaku za studena byla stanovena na zlomcích z kvádrů 160x40x40 mm.

Typ žárobetonové směsi	[N.mm <sup>-2</sup> ]	Typ žárobetonové směsi	[N.mm <sup>-2</sup> ]
DC110	72,81	SC110	22,19
DC400	57,19	SC400	27,19
DC800	51,56	SC800	35,63
DC1200	30,31	SC1200	39,69
MC110	77,50	PC110	15,31
MC400	89,38	PC400	14,38
MC800	71,88	PC800	20,00
MC1200	76,88	PC1200	26,56
LC110	74,38	HC110	47,81
LC400	82,81	HC400	54,38
LC800	100,31	HC800	71,25
LC1200	139,38	HC1200	85,31

Tabulka 16. Pevnosti v tlaku za studena



Obr. 22 Zkušební těleso po zkoušce pevnosti v tlaku

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena na vzorcích od každé směsi a teploty.

Typ žárobetonové směsi	[N.mm <sup>-2</sup> ]	Typ žárobetonové směsi	[N.mm <sup>-2</sup> ]
DC110	7,34	SC110	1,65
DC400	3,54	SC400	2,28
DC800	3,08	SC800	3,24
DC1200	2,93	SC1200	4,79
MC110	7,33	PC110	2,54
MC400	6,32	PC400	1,60
MC800	5,14	PC800	2,40
MC1200	8,84	PC1200	3,54
LC110	7,52	HC110	11,35
LC400	7,13	HC400	8,12
LC800	9,17	HC800	6,86
LC1200	12,97	HC1200	7,73

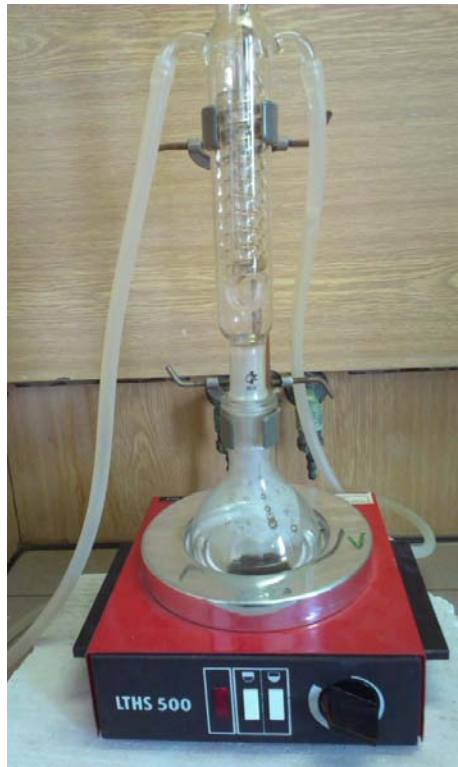
Tabulka 17. Pevnost v tahu za ohybu

#### 4.5 Kyselinovzdornost

Zkušebním vzorkem pro zkoušku kyselinovzdornosti je cca 20g směsi o zrnitosti 0,80 – 0,63mm. Zkouška byla provedena na všech teplotách výpalu i na vzorcích po vysušení.

Typ žárobetonové směsi	[%]	Typ žárobetonové směsi	[%]
DC110	26,75	SC110	6,06
DC400	20,80	SC400	5,05
DC800	22,80	SC800	6,13
DC1200	20,80	SC1200	0,80
MC110	31,44	PC110	15,68
MC400	17,73	PC400	19,43
MC800	13,97	PC800	18,06
MC1200	10,62	PC1200	17,25
LC110	18,08	HC110	6,09
LC400	17,27	HC400	7,19
LC800	11,22	HC800	3,07
LC1200	6,78	HC1200	0,80

Tabulka 18. Kyselinovzdornost žárobetonů



Obr. 23 Zkušební aparatura pro zkoušení kyselinovzdornosti

#### 4.6 Konfokální mikroskopie

Typ žárobetonové směsi	Pa [ $\mu\text{m}$ ]	Pq [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]
LC1200	3,5781	4,7523	1,8430	2,4665
SC1200	5,8853	7,9810	2,5482	3,4791
PC800	24,3900	34,4320	7,0440	9,9920
HC1200	42,0925	55,6282	13,8436	18,6468

Tabulka 19. Naměřené hodnoty před degradací

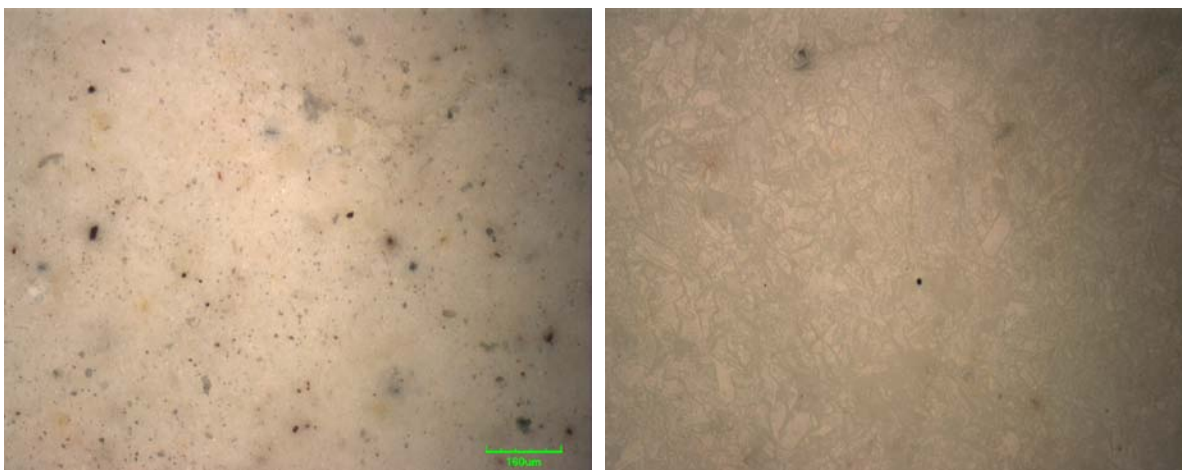
Typ žárobetonové směsi	Pa [ $\mu\text{m}$ ]	Pq [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]
LC1200	5,6890	7,3831	4,2243	5,6246
SC1200	8,1267	11,0586	4,8301	6,4299
PC800	14,4054	18,3229	6,8832	8,8990
HC1200	34,6063	43,4358	10,4416	14,4717

Tabulka 20. Naměřené hodnoty po degradaci

Typ žárobetonové směsi	Pa [%]	Pq [%]	$\text{Ø P}$ [%]	Ra [%]	Rq [%]	$\text{Ø R}$ [%]
LC1200	58,99	55,36	57	129,21	128,04	129
SC1200	38,09	38,56	38	89,55	84,81	87
PC800	-40,94	-46,79	-44	-2,28	-10,94	-7
HC1200	-17,79	-21,92	-20	-24,57	-22,39	-23

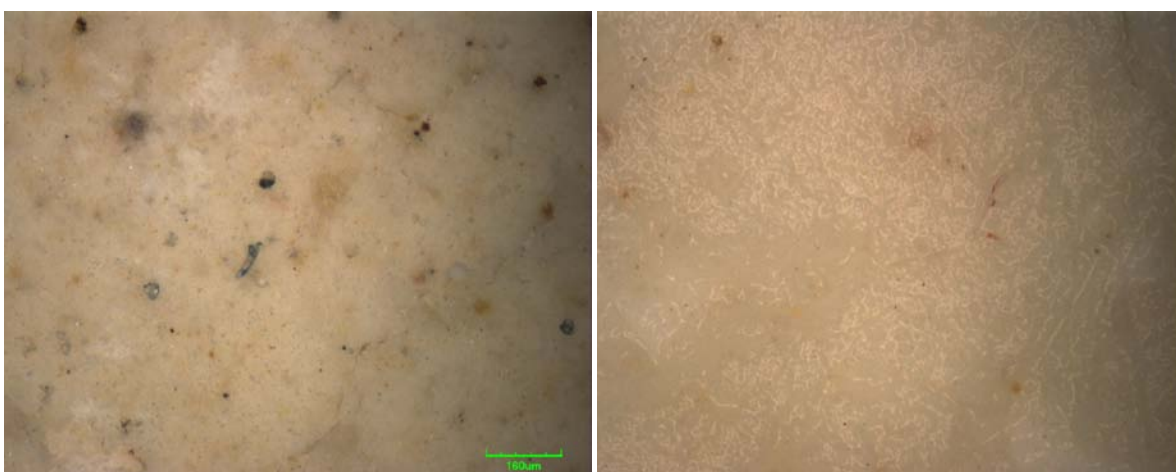
Tabulka 21. Změna parametrů





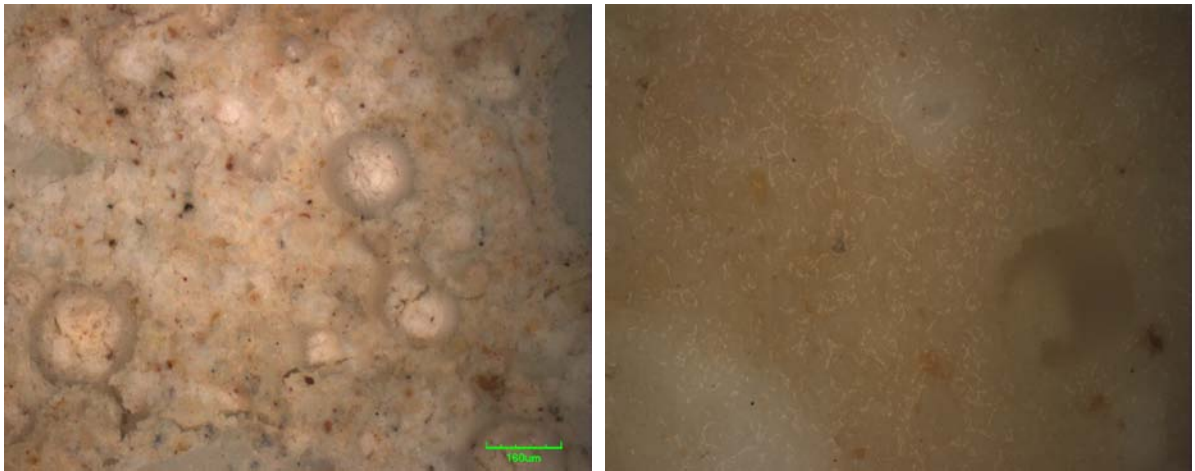
Obr. 24 Povrch vzorku LC1200 před a po degračním procesu

Vzorek LC vykazuje před degradací vyšší drsnost než po degradaci, a to o 129%. Zakřivená plocha profilu se zvýšila o 57%.



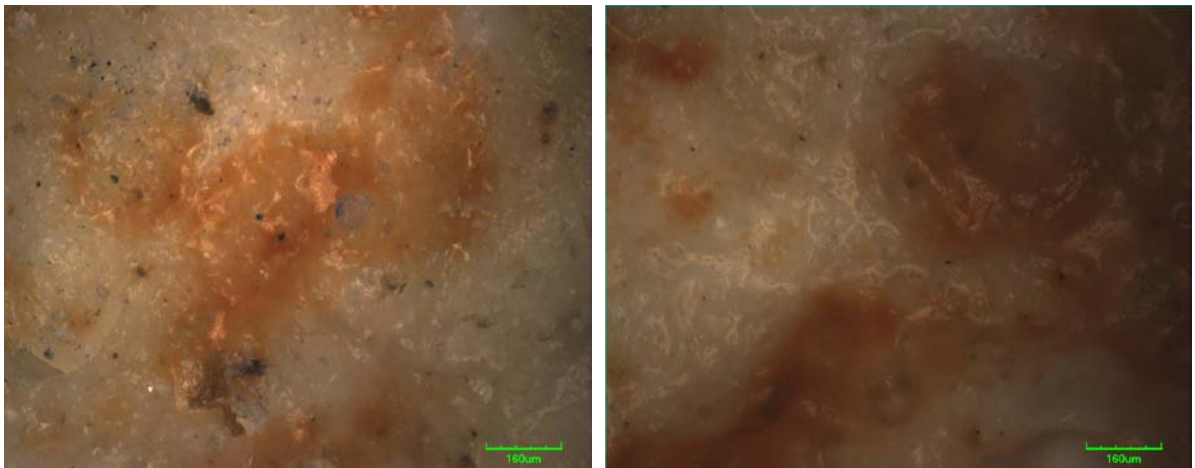
Obr. 25 Povrch vzorku SC1200 před a po degračním procesu

Vzorek SC 1200 vykazuje před degradací vyšší drsnost než po degradaci, a to o 87%. Zakřivená plocha profilu se zvýšila o 38%.



Obr. 26 Povrch vzorku PC800 před a po degračním procesu

Vzorek PC 800 vykazuje před degradací nižší drsnost než po degradaci, a to o 7%.  
Zakřivená plocha profilu se zmenšila o 44%.



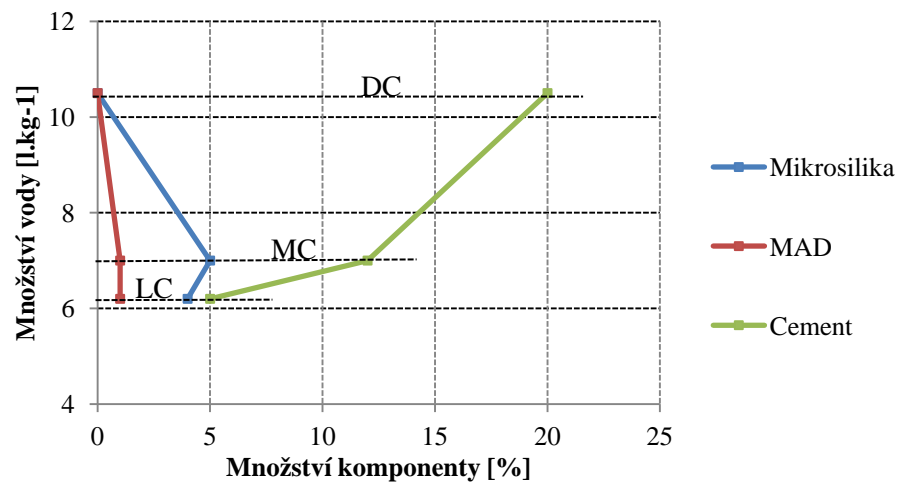
Obr. 27 Povrch vzorku HC1200 před a po degračním procesu

Vzorek HC vykazuje před degradací nižší drsnost než po degradaci, a to o 23%.  
Zakřivená plocha profilu se zmenšila o 20%.

## 5 Diskuse výsledků

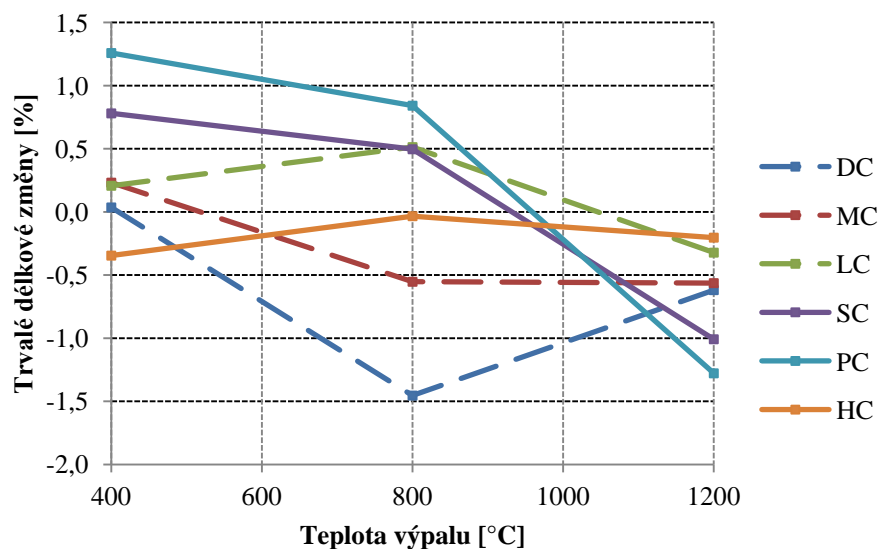
Byla vyrobena zkušební tělesa z šesti směsí žárobetonu. Tyto směsi se lišily množstvím hlinitanového cementu a rozdílným druhem vazby. Směs DC, řadící se do kategorie žárobetonu běžných, obsahovala 20 % hlinitanového cementu. Směs MC, řadící se do kategorie žárobetonu se středním množstvím cementu, obsahovala 12 % hlinitanového cementu. Směs LC, řadící se do kategorie žárobetonů s nízkým obsahem cementu, obsahovala 5 % hlinitanového cementu. Směs SC byla pojena vazbou Sol-gel, další chemickou vazbou byla receptura s kyselinou fosforečnou označována PC, poslední recepturou byla směs pojena pomocí vodního skla značena jako HC. Jiné odlišnosti mezi jednotlivými typy žárobetonových směsí byly dále v obsahu dispergačních činidel a dalších příměsí. Po namíchání směsí byla stanovena konzistence, po tepelném zpracování byla u jednotlivých zkušebních těles stanovena trvalá délková změna, objemová hmotnost a zdánlivá pórovitost, nasákavost a zdánlivá hustota, pevnost v tlaku za studena, pevnost v tahu za ohybu, kyselinovzdornost a pozorování pomocí konfokální mikroskopie.

*Konzistence* byla stanovena u všech směsí neprodleně po zamíchání. Na množství vody mělo vliv množství mikroplniva, hlinitanového cementu a komplexní dispergační přísady MADS. S narůstajícím množstvím cementu byla zvyšována i dávka vody. Při nižším množství cementu bylo nutné nahradit cement určitým množstvím mikroplniva, za použití komplexního dispergačního činidla MADS, které zlepšuje zpracovatelnost směsi a zpomaluje tuhnutí v letních měsících. Mikroplnivo výborně vyplnilo mezery mezi cementem, čímž zajistilo kvalitní hutnost a tím i vlastnosti, jako jsou otěruvzdornost, počáteční a konečná pevnost a korozivzdornost. U chemicky vázaných žárobetonů, kde nebyl použit hlinitanový cement, vyšla konzistence srovnatelná. Voda byla součástí roztoků, které byly do systému zavedeny s rozdělovací kapalinou.



Obr. 28 Vliv množství mikrosiliky, hlinitanového cementu a MAD

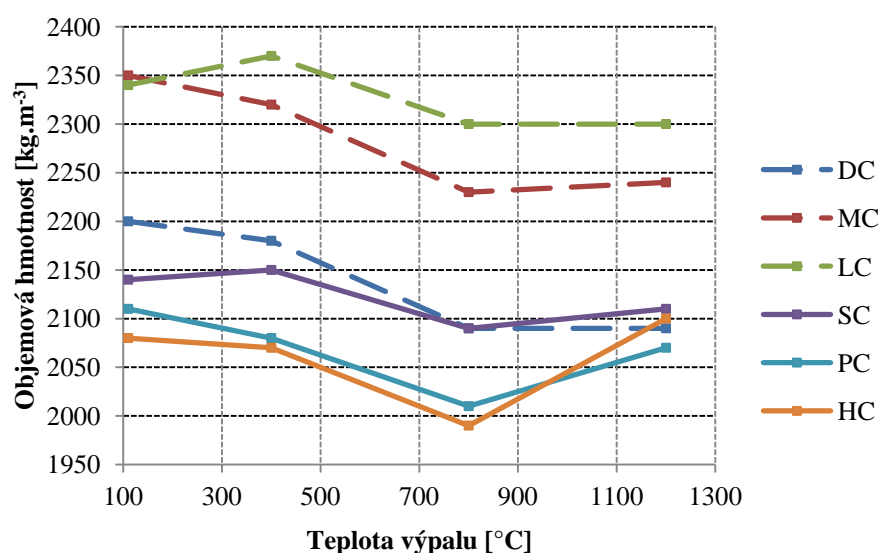
*Trvalé délkové změny* byly stanoveny u všech typů žárobetonů. Vysoké hodnoty byly zaznamenány zejména u žárobetonů typu DC, kde je normální množství hlinitanového cementu a žádné příměsi, a PC, kde je pojivem kyselina fosforečná, což způsobuje dodatečné smrštění při vysoušení a výpalu. Při vyšším obsahu hlinitanového cementu je velké množství hydrátů, které se během výpalu do teploty 800°C rozkládají při modifikační přeměně se změnou velikosti a distribuce pórů. Naopak nízké hodnoty vykazovaly žárobetony typu MC, se středním obsahem hlinitanového cementu, a LC, s nízkým obsahem hlinitanového cementu vlivem dobrého vyplnění mezer mezi cementem mikroplnivou a nízkým nárůstem pórovitosti při zániku hydraulické vazby. K vyrovnanému průběhu trvalých délkových změn, kdy došlo k velmi malému smrštění u všech vypalovacích teplot, u receptury HC přispěl přídavek  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , který urychlil kondenzaci kyseliny křemičité.



Obr. 29 Vliv teploty výpalu na trvalou délkovou změnu

*Objemová hmotnost* byla naměřena nejvyšší u žárobetonů typu LC a MC vlivem dobrého vyplnění mezer mezi zrny cementu mikroplnivý. Množství hlinitanového cementu a záměsově vody způsobuje vyšší pórovitost, která vzrůstá v průběhu zahřívání, kdy se hydraulické pojivo modifikuje a nakonec úplně zaniká dehydratačním procesem. V průběhu této modifikace struktury se mění distribuce a velikost pórů. Obecně u těchto žárobetonů byl sledován pokles objemové hmotnosti cca do 800°C, kdy zaniká hydraulická vazba.

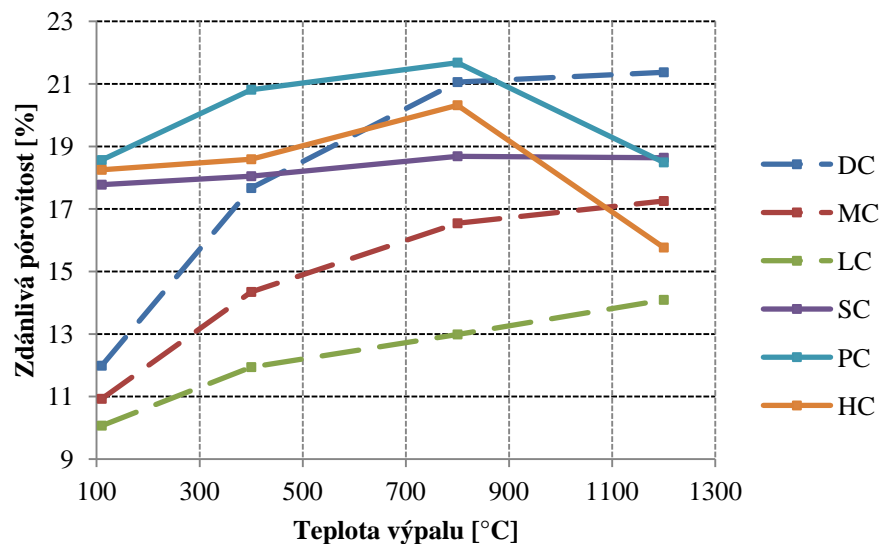
Nejnižší hodnoty naopak vykázal žárobeton typu HC, u kterého složení způsobilo vyšší pórovitost, která vzrůstala až do teploty 800°C, kdy se díky přidavku vodního skla, tedy alkálií, snížila teplota vzniku tekuté fáze – eutektikum v soustavě Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> je pod 800°C. V průběhu této modifikace struktury se mění distribuce a velikost pórů.



Obr. 30 Vliv teploty výpalu na objemovou hmotnost

*Zdánlivá pórovitost* byla stanovena na identických zlomcích jako objemová hmotnost. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u žárobetonů typu DC, kdy počáteční nárůst pórovitosti je ovlivněn modifikační přeměnou hydraulického pojiva za současné změny distribuce a velikosti pórů. Vliv slinování při vyšších teplotách neměl na pórovitost markantní vliv. Objemová hmotnost a zdánlivá pórovitost je tedy ovlivněna jak teplotou výpalu a množstvím hlinitanového cementu, tak množstvím komplexního dispergačního činidla a mikroplniva.

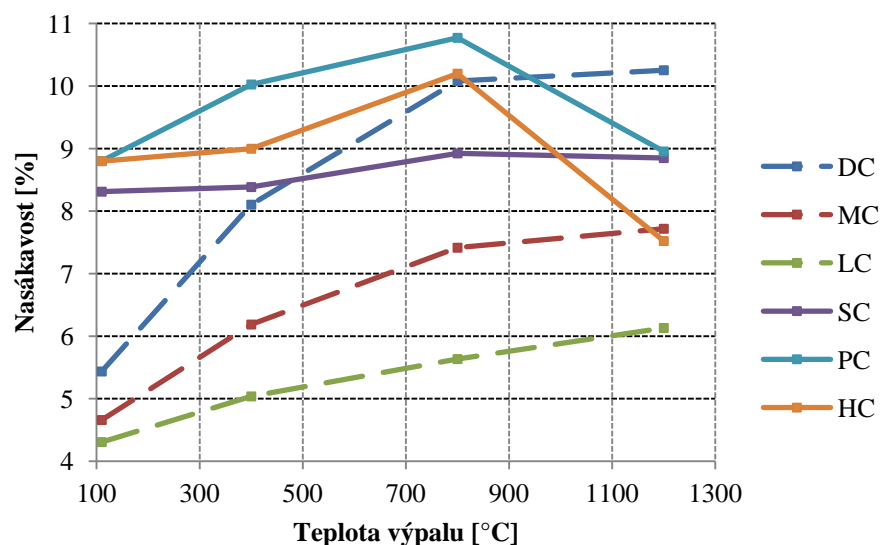
U chemicky pojených žárobetonů došlo do 800°C k mírnému nárůstu, a po výpalu na 1200°C došlo ke snížení zdánlivé pórovitosti. Pórovitost je u těchto soustav stabilní a naopak při vysokých výpalech lze dosáhnout i jejího snížení.



Obr. 31 Vliv teploty výpalu na zdánlivou pórovitost

Nasákavost byla stanovena na totožných zlomcích jako objemová hmotnost a zdánlivá pórovitost. Nasákavost narůstala vlivem modifikačních přeměn, kdy se měnily produkty hydratace. Okolo 800°C zanikla hydraulická vazba a zvýšení pórovitosti již nebylo tak vysoké.

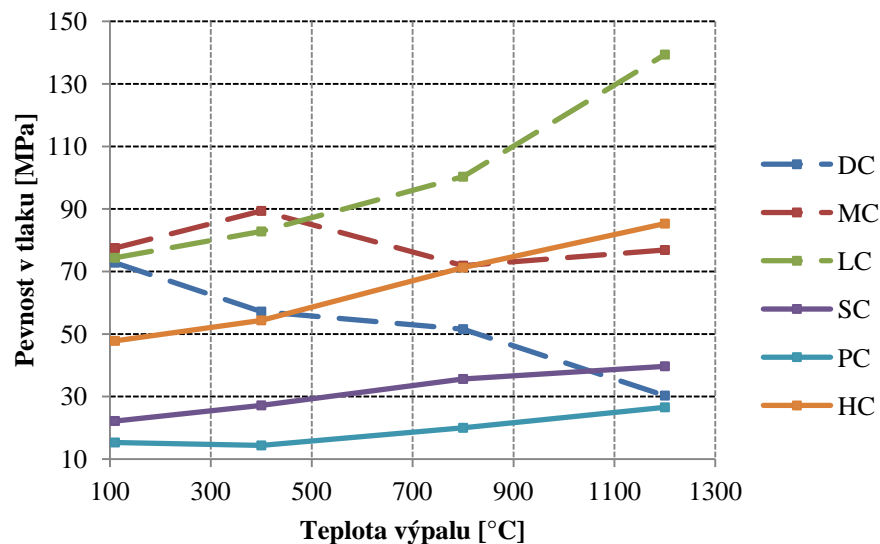
U směsí SC, PC a HC, byla počáteční nasákavost vyšší a to díky tomu, že v recepturách nebylo použito mikroplniv. Jako u zdánlivé hustoty pozorujeme zlepšení hodnot při výpalu na 1200°C.



Obr. 32 Vliv teploty výpalu na nasákavost

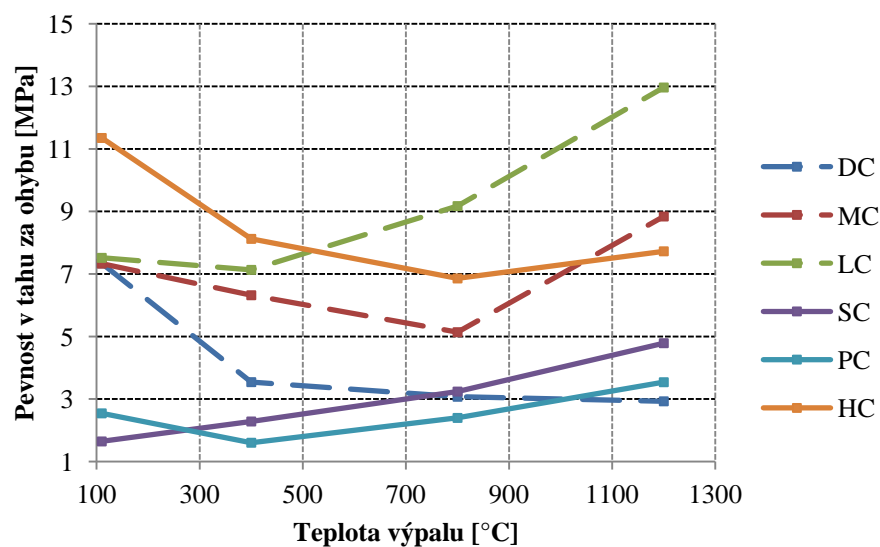
*Pevnost v tlaku za studena.* Nejlepších výsledků bylo dosaženo u žárobetonů typu LC a MC, jak lze předpokládat z jejich objemové hmotnosti a zdánlivé pórovitosti. Vysoké hodnoty (až 139 MPa při výpalu na 1200°C) jsou způsobeny velmi nízkým obsahem hlinitanového cementu, přítomností komplexního dispergačního činidla a mikroplniva ve formě jemně mletého  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a mikrosiliky, které v počátku výpalu při modifikační přeměně hydraulické vazby na keramickou způsobují nárůst pórovitosti, ale vlivem částečného slinutí při teplotách výpalu nad 800°C a výborného vyplnění mezer mezi zrny cementu zaručují vysokou hutnost. Žárobeton typu DC neobsahoval žádné příměsi ani přísady a obsahoval vysoké množství hlinitanového cementu. Tyto faktory ovlivnily spolu s teplotou výpalu jeho pokles pevností v jednotlivých stádiích výpalu. Jejich největší výhodou (odlišení) oproti hydraulicky vázaným představuje možnost velmi rychlého

U chemicky vázaných žárobetonů lze sledovat pozvolný nárůst pevností. Oproti hydraulicky pojeným žárobetonům mají tyto výhodu při uvedení vyzdívky do provozu, a to bez předchozího zdlouhavého předsoušení. Příčinou u receptury PC je použité tekuté fosfátové pojivo v kombinaci s reaktivními přísadami v suché žárobetonové směsi. Tato kombinace výrazně eliminuje podíl volné vody v žárobetonovém střepe. V kritické oblasti 100-200°C uniká pouze velmi malý objem vody ze žárobetonové vrstvy, takže i při rychlém růstu teplot nedochází k poruchám vyzdívky. Ostatní voda ve střepe je chemicky vázána (v kyselině fosforečné, v hydratovaných solích) a její uvolňování probíhá v širokém teplotním spektru až do 1000°C. Uvolňování je mimo to postupné, odvislé od teploty rozkladu. U žárobetonů SC vázaných solem  $\text{SiO}_2$  lze převážnou část vody odstranit do 100°C, zatímco hydrátová voda v hydraulicky vázaných žáromonolitech se odpařuje při podstatně vyšších teplotách. Proces sušení pak může být o mnoho rychlejší, vlastnosti žáromonolitu jsou méně závislé na teplotě.



Obr. 33 Vliv teploty výpalu na pevnost v tlaku za studena

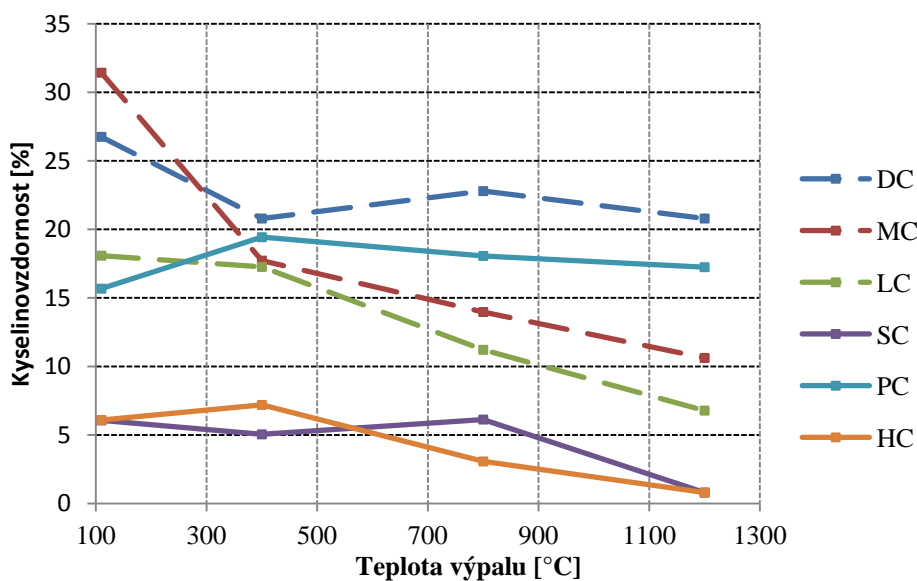
*Pevnost v tahu za ohybu za studena.* Nejlepších výsledků dosáhl žárobeton typu LC. U žárobetonu typu DC došlo výpalem k poklesu pevností. Nejvyšších hodnot počátečních pevností dosáhl žárobeton pojen vodním sklem, avšak se vzrůstající vypalovací teplotou konečné pevnosti klesaly.



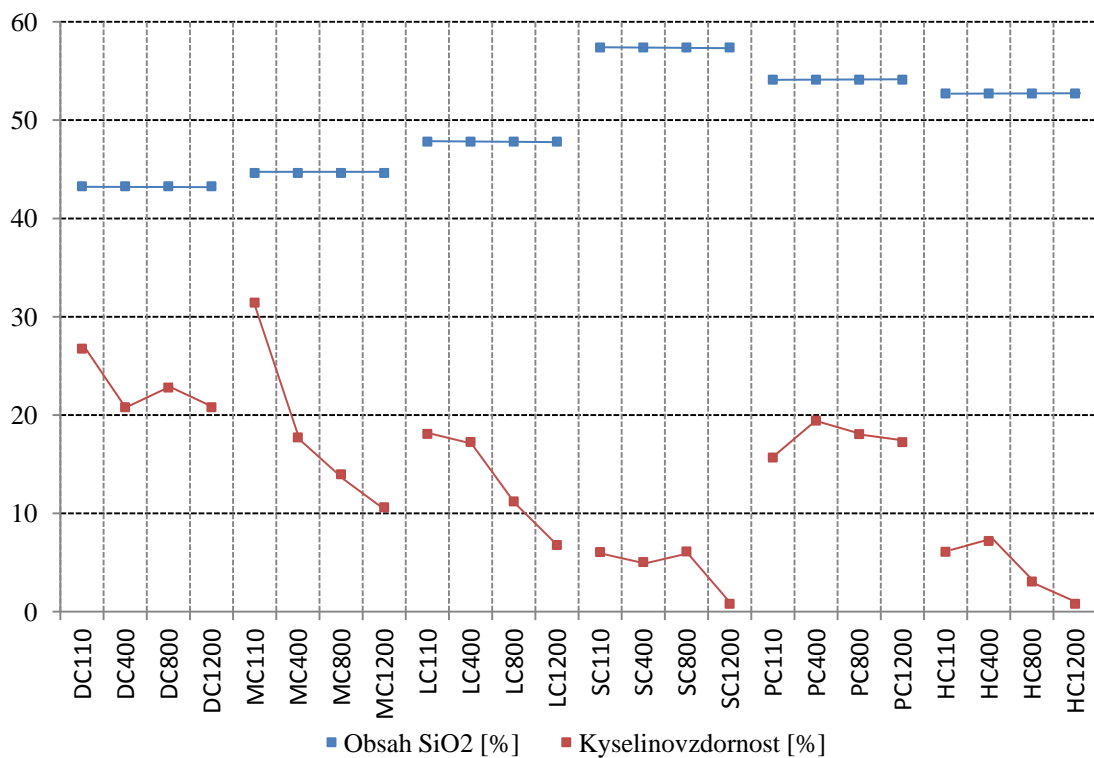
Obr. 34 Vliv teploty výpalu na pevnost v tahu za ohybu



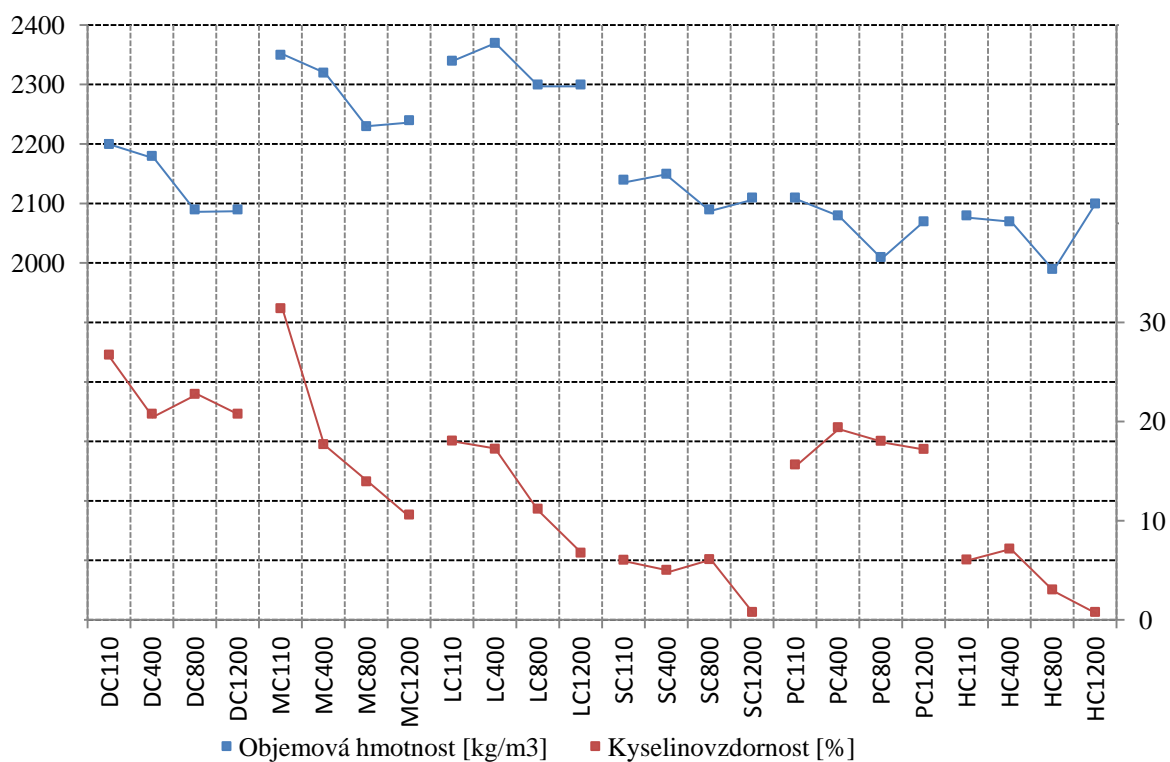
*Kyselinovzdornost.* Kyselinovzdornost u hydraulicky pojených žárobetonů je nízká. Její zvýšení ovlivňuje teplota výpalu žárobetonu, ale hlavně snížení obsahu cementu, který je pro svoji alkalitu málo odolný kyselinám. Pozitivní vliv u hydraulicky pojených žárobetonů tak mělo snižování obsahu cementu a vnášení mikroplniv do pojivé složky. Mikropórovitá struktura je tak výhodná při styku vyzdívky s korozním prostředím. Chemicky pojené žárobetony nedosahují tak dobrých výsledků v kritériích hutnosti, odolnost vůči působení agresivního prostředí tak zajišťují použitím chemické vazby. Dobře zvolená chemická vazba má pozitivní vliv pro odolnost proti kyselinám. Neuspokojivý výsledek vykazoval žárobeton PC, v praxi však vzniklé rozpustné fosforečné soli mají při vysoušení tendenci migrovat k povrchu vyzdívky. Zde mohou uzavírat povrchové póry, což v mnohých provozních podmínkách zabraňuje vnikání škodlivých složek hlouběji do struktury. Zde však bylo zkoušeno podrcené těleso. Žárobetony SC a HC lze označit za kyselinovzdorné již od vysušení. Nejvyšších hodnot lze dosáhnout při výpalu na 1200°C.



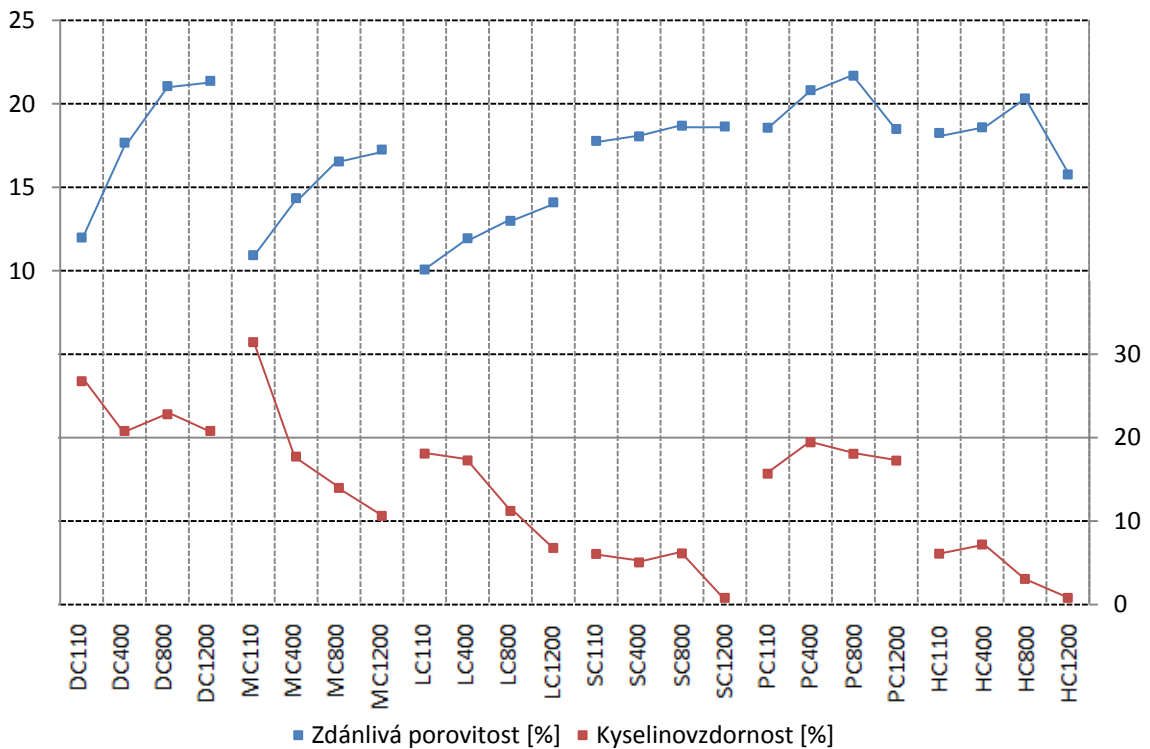
Obr. 35 Vliv teploty výpalu na kyselinovzdornost



Obr. 36 Vliv obsahu SiO<sub>2</sub> na kyselinovzdornost



Obr. 37 Vliv objemové hmotnosti na kyselinovzdornost



Obr. 38 Vliv zdánlivé pórovitosti na kyselinovzdornost

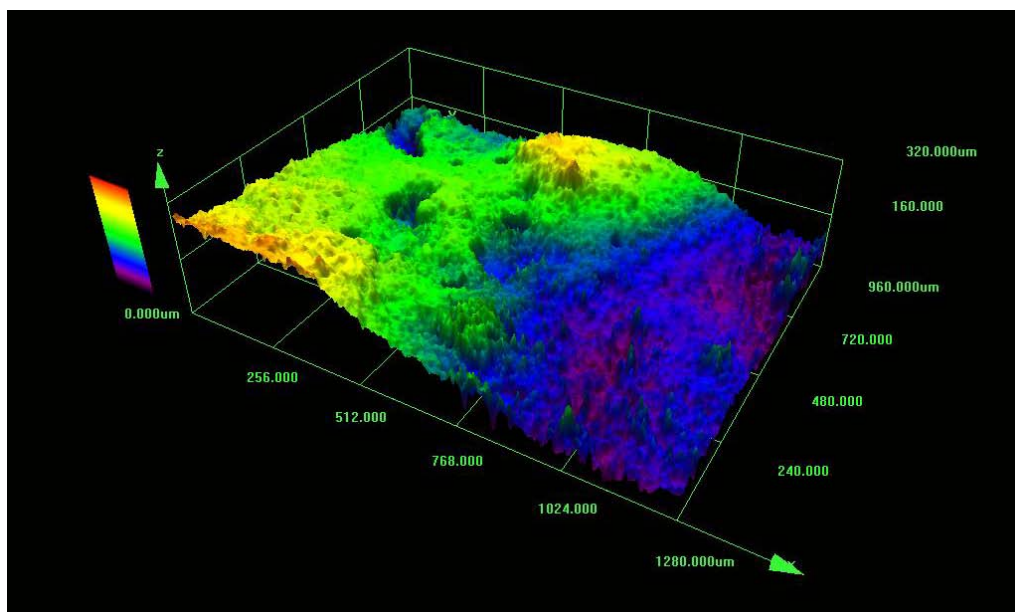
*Vliv na kyselinovzdornost.* Z uvedených závislostí vyplývá, že obsah  $\text{SiO}_2$ , jakožto kyselého oxidu, u hydraulicky pojených žárobetonů kyselinovzdornost zvyšuje. V chemicky pojených žárobetonech má obsah  $\text{SiO}_2$  pozitivní vliv u receptur SC a HC. Směs PC však tento trend nevykázala.

Dále měření prokázalo, že s klesající objemovou hmotností jsou žárobetony více odolné působení kyselin.

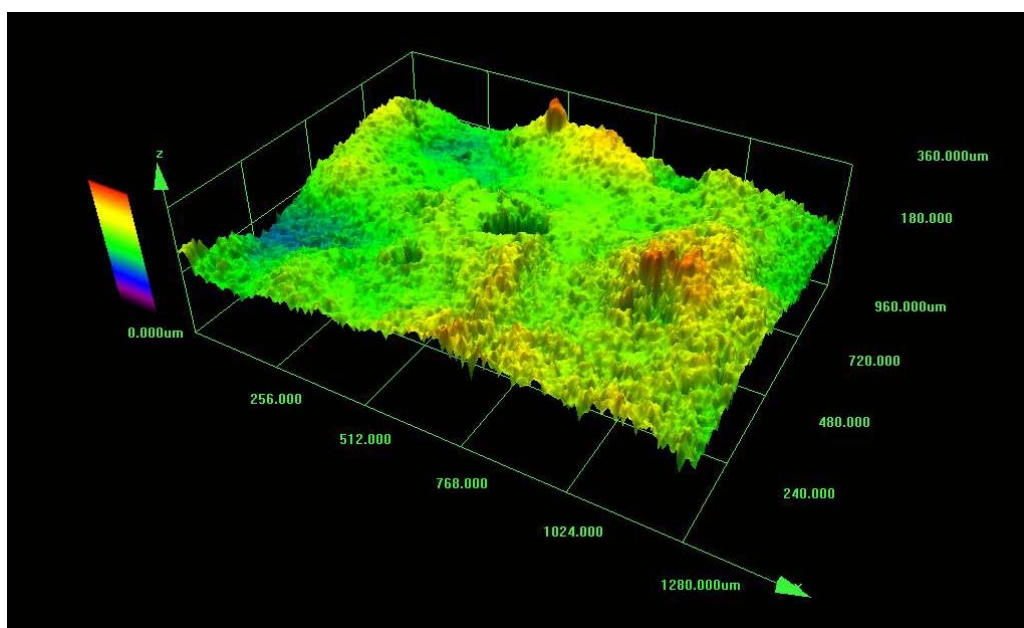
Třetí graf ukazuje, že u chemicky vázaných žárobetonů s klesající pórovitostí roste kyselinovzdornost, na rozdíl od žárobetonů hydraulicky vázaných

*Konfokální mikroskopie.* Z uvedených obrázků, složených ze snímků konfokálního mikroskopu je patrné, že se povrch vzorků po zkoušce kyselinovzdornosti zásadně mění. Stává se drsnějším nebo naopak hladším, což je ideálně vidět na trojrozměrném řezu vzorkem.

Tvarová změna může mít vliv na dlouhodobou odolnost vůči pronikání chemicky agresivních látek. Tyto hodnoty lze také vzít v úvahu pro aplikaci ochranných nátěrů a míru jejich spotřeby a to zejména u opakovaných aplikací při oprávkách agregátů.



Obr. 39 Trojrozměrné znázornění povrchu před degradačním procesem



Obr. 40 Trojrozměrné znázornění povrchu po degradačním procesu

## 6 Závěr

Teoretická část práce se zabývala obecným popsáním druhů žárobetonů, složení žárobetonových směsí a jejich charakteristických vlastností. V praktické části byly zkoušeny různé receptury žárobetonů.

Kyselinovzdornost se obecně u žárobetonů příliš nezkouší (zejména u netvarových), jsou však aplikace, kde při poměrně nízkých teplotách již není možné použít běžné stavební betony. Zejména jde o odtahy spalin, výdechové části pecních zařízení, průmyslové podlahy apod., z toho vyplývají požadavky na korozní odolnost a odolnost proti abrazi. Při těchto aplikacích převažuje koroze kyselými plyny a parami a nastává zde možnost kondenzace různých sloučenin síry. Proto byly vzorky podrobeny zkoušce v roztoku kyseliny sírové.

Pro stanovení kyselinovzdornosti netvarových žárobetonů nejsou konkrétní normové zkoušky, použitá metodika z normy ČSN platí pro hutné žárobetonové výrobky tvarové. Podle zatřídění dle ČSN ISO 10080 lze jako kyselinovzdorné žárobetony považovat:

1. skupina – SC 1200, HC 1200
2. skupina – HC 800
3. skupina – LC 1200, SC 1200, 400, 800 a HC 110

Pro prostředí, kde působí kyseliny, nejsou vhodné žárobetony pojené hydraulickou vazbou. Kyselinovzdornost vykazuje pouze žárobeton LC 1200, ten je však pro aplikace do dtředních teplot příliš ekonomicky nevýhodný. Tento žárobeton však vykazuje vysoké pevnosti, se kterými se z chemicky pojených žárobetonů může konkurovat pouze žárobeton HC 1200. Jak je tedy z výsledků patrné, kyselinovzdornost je závislá na chemickém složení, výhodou je vyšší obsah kyselých oxidů.

Pro vhodnost receptury pro aplikaci do agregátů je tedy nutné vzít v úvahu požadavky na tuto směs. A to jak fyzikálně-mechanické: pevnosti v tlaku a tahu za ohybu, objemové a hmotnostní změny, kyselinovzdornost, tak i požadavek na tvarovou stálost povrchu.

Odolnost žárobetonů proti působení kyselého prostředí není prozatím příliš prozkoumána, z výsledků tedy doporučuji v rizikových aplikacích, kde hrozí koroze kyselým prostředím, chemicky vázané žárobetony. Nejvhodnější recepturou je žárobeton pojen vodním sklem – receptura HC. Tento žárobeton je kyselinovzdorný již po vysušení a vykazuje dobré i další sledované vlastnosti.

## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] STAROŇ, Jozef a František TOMŠŮ. *Žiaruvzdorné materiály: Výroba, vlastnosti a použitie*. Bratislava: Alfa, 1992, 399 s. ISBN 80-050-1023-0.
- [2] JERSÁK, Vladislav. *Zkoumání mechanických vlastností žárobetonů s ohledem na jejich použití pro keramické kotevní prvky*. Brno, 2007. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [3] TOMŠŮ, František a Štefan PALČO. *Žárovzdorné materiály*. Vyd. 1. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2009, 110 s. ISBN 978-80-02-02170-4.
- [4] ČSN EN 1402-1. *Žárovzdorné výrobky netvarové: Část 1: Úvodní ustanovení a klasifikace*. Plzeň: Český normalizační institut, 2004.
- [5] LACH, Vladimír. *Keramika*. 3. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992, 172 s. ISBN 80-214-0332-2.
- [6] Samotekoucí žárobeton (SFC). In: *Nové skelné a keramické materiály a pokročilé postupy jejich příprav a výrob II* [online]. 2011 [cit. 20.9.2014]. Dostupné z: [http://www.ceramics-silikaty.cz/lam\\_konference/prezentace/Kutzendorfer.pdf](http://www.ceramics-silikaty.cz/lam_konference/prezentace/Kutzendorfer.pdf)
- [7] JAROSLAVA, Medvecová a Mužík PETR. *Žárobeton na bázi kaolinových ostřiv*. Brno, 2003. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2003texty/pdf/4-2/np/medvecova.pdf>
- [8] *Refractory materials: pocket manual ; design, properties, testing*. 3rd ed. Editor Gerald Routschka, Hartmut Wuthnow. Essen: Vulkan, 2008, 621 s. Edition heat processing. ISBN 978-3-8027-3158-7.
- [9] LANG, Karel. *Žárovzdorné materiály*. Vyd. 1. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2010, 128 s. ISBN 978-80-02-02244-2.
- [10] PEŠEK, Jiří, J. FIALA, B. KORSA, L. RYBÁK, P. FAJFR a J. HAMÁČEK. Bezcementové žárobeton s vazbou sol – gel, jejich výhody a nevýhody. *Keramický zpravodaj: Referátový časopis pro silikátový průmysl*. 2008, roč. 24, č. 4. ISSN 12102520.
- [11] Stavebná chemia. *Sklá*. 2007, č. 7. Dostupné z: <http://www.kmti.szm.com/ch-p7.pdf>
- [12] KAVAN, Vojtěch a Milan HENEK. Monolitické vyzdívky pro střední teploty použití. *Silikaweb* [online]. 2012, č. 1 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: <http://www.silikaweb.cz/index.php/cs/aaaa-2/1-2012/26-monoliticke-vyzdivky-pro-stredni-teploty-pouziti>

- [13] PAVOL, Vadász. TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH, Hutnícka fakulta. *Opotrebenie žmv v metalurgii*. Košice, 2006.
- [14] KUTZENDÖRFER, Jaroslav. *Koroze žárovzdorných materiálů*. Praha: Silikátová společnost České republiky, 1998, 34 s. ISBN 80-020-1204-6.
- [15] ČSN EN 993-16. *Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 16: Stanovení odolnosti proti kyselině sírové*. Plzeň: Český normalizační institut, 1996.
- [16] SOKOLÁŘ, Radomír a Lenka SMETANOVÁ. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Keramika - laboratoře*. Brno, 2006.
- [17] ŠAŠEK, L. , BARTUŠKA, M. *Laboratorní metody v oboru silikátů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 319 s., obr. příl.

## Seznam obrázků a tabulek

- Obr. 1 Teplotní účinnost typu vazby
- Obr. 2 Označení typu žárobetonů
- Obr. 3 Závislost pevnosti v ohybu různých druhů žáruvzdorných monolitů na teplotě
- Obr. 4 Binární diagram  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$
- Obr. 5 Základní druhy mechanického opotřebení
- Obr. 6 Trámečková ponořovací statická metoda, vzorky po zkoušce
- Obr. 7 Řez zkorodovaným kelímkem
- Obr. 8 Modelová metalurgická pec
- Obr. 9 Trámečková ponořovací dynamická metoda
- Obr. 10 Použité frakce páleného kaolinu, mikromleté  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , hlinitan. cement Secar 71
- Obr. 11 Pálicí křivky, pálicí pec Clasic
- Obr. 12 Zkušební vzorky po vysušení, vypálené na 400, 800 a 1200°C
- Obr. 13 Chemické složení zkoušených žárobetonů
- Obr. 14 Zastoupení oxidů ve zkoumaných žárobetonech
- Obr. 15 Ocelová forma pro stanovení konzistence
- Obr. 16 Stanovení konzistence po roztečení kužele
- Obr. 17 Konfokální mikroskop
- Obr. 18 Schematické znázornění pojmů tvaru povrchu
- Obr. 19 Schematické znázornění střední aritmetické výšky drsnosti
- Obr. 20 Schematické znázornění střední kvadratické hodnoty drsnosti
- Obr. 21 Schematické znázornění aritmetické střední výšky zakřivené plochy profilu
- Obr. 22 Zkušební těleso po zkoušce pevnosti v tlaku
- Obr. 23 Zkušební aparatura pro zkoušení kyselinovzdornosti
- Obr. 24 Povrch vzorku LC1200 před a po degradačním procesu
- Obr. 25 Povrch vzorku SC1200 před a po degradačním procesu
- Obr. 26 Povrch vzorku PC800 před a po degradačním procesu
- Obr. 27 Povrch vzorku HC1200 před a po degradačním procesu
- Obr. 28 Vliv množství mikrosiliky, hlinitanového cementu a MAD
- Obr. 29 Vliv teploty výpalu na trvalou délkovou změnu
- Obr. 30 Vliv teploty výpalu na objemovou hmotnost
- Obr. 31 Vliv teploty výpalu na zdánlivou pórovitost
- Obr. 32 Vliv teploty výpalu na nasákavost



- Obr. 33 Vliv teploty výpalu na pevnost v tlaku za studena  
Obr. 34 Vliv teploty výpalu na pevnost v tahu za ohybu  
Obr. 35 Vliv teploty výpalu na kyselinovzdornost  
Obr. 36 Vliv obsahu SiO<sub>2</sub> na kyselinovzdornost  
Obr. 37 Vliv objemové hmotnosti na kyselinovzdornost  
Obr. 38 Vliv zdánlivé pórovitosti na kyselinovzdornost  
Obr. 39 Trojrozměrné znázornění povrchu před degračním procesem  
Obr. 40 Trojrozměrné znázornění povrchu po degračním procesu

- Tabulka 1. Teplotní rozsah působení jednotlivých druhů vazby  
Tabulka 2. Složení cementů používaných jako pojivo do žárobetonových směsí  
Tabulka 3. Používané zpomalovače tuhnutí  
Tabulka 4. Používané urychlovače tuhnutí  
Tabulka 5. Kyselinovzdornost kameniv  
Tabulka 6. Složení žárobetonové směsi DC  
Tabulka 7. Složení žárobetonové směsi MC  
Tabulka 8. Složení žárobetonové směsi LC  
Tabulka 9. Složení žárobetonové směsi SC  
Tabulka 10. Složení žárobetonové směsi PC  
Tabulka 11. Složení žárobetonové směsi HC  
Tabulka 12. Roztékání a množství vody na 100kg suché žárobetonové směsi  
Tabulka 13. Trvalé délkové změny  
Tabulka 14. Hmotnostní ztráta žíháním  
Tabulka 15. Kriteria hutnosti  
Tabulka 16. Pevnosti v tlaku za studena  
Tabulka 17. Pevnost v tahu za ohybu  
Tabulka 18. Kyselinovzdornost žárobetonů  
Tabulka 19. Naměřené hodnoty před degradací  
Tabulka 20. Naměřené hodnoty po degradaci  
Tabulka 21. Změna parametrů