



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 PILIN NA ŽÁROVZDORNOST LEHČENÉHO ŠAMOTU

THE EFFECT OF SAWDUST ON THE REFRACTORINESS OF INSULATION CHAMOTTE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VERONIKA SMÉKALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. RADOMÍR SOKOLÁŘ, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Veronika Smékalová

Název Vliv pilin na žárovzdornost lehčeného šamotu

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....
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. Technologie keramiky. Vega 2001
- [2] Tomšů, F., Palčo, Š. Žárovzdorné materiály IV. Netvarové žárovzdorné materiály. ČSVTS - Silikátová společnost ČR, 2009
- [3] Kutzendorfer, J., Tomšů, F. Žárovzdorné materiály I. Základní pojmy, rodění, vlastnosti. ČSVTS - Silikátová společnost ČR, 2008.

Zásady pro vypracování

Pro výrobu některých žárovzdorných tepelně izolačních materiálů je využíváno tradiční vyhořivající lehčivo - dřevěné piliny, které mohou výrazně ovlivňovat vlastnosti žáromateriálu, mj. klasifikační teplotu, žárovzdornost, únosnost v žáru, pórovitost apod.

Cíle bakalářské práce:

- v rámci teoretické části práce provést rešerši doposud publikovaných zkušeností v oblasti vlivu typu použitých pilin (jehličnaté vs. listnaté dřeviny) na vlastnosti lehčených šamotů,
- v praktické části posuďte vliv smrkových a bukových pilin na vlastnosti (žárovzdornost, klasifikační teplota, smrštění výpalem, součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost) lehčeného šamotu na bázi žárovzdorného jílu,
- dosažené výsledky interpretujte s ohledem na obsah alkálií ve vypáleném střepu, resp. v popelu vzniklém po vyhoření posuzovaných druhů pilin.

Předpokládaný rozsah práce cca 40.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....
doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Lehčené šamotové výrobky mají své místo mezi žárovzdornými materiály. Stále nejčastějším způsobem lehčení je pomocí vyhořívajících složek. Tato bakalářská práce se v teoretické části zabývá surovinami pro výrobu lehčeného šamotu, dále samotnou výrobou a také zkouškami, které se provádí na lehčených šamotových výrobcích. Nedílnou součástí je i zpracování zahraničních výsledků v této oblasti.

Praktická část se zabývá zkoumáním vlivu smrkových a bukových pilin na určité vlastnosti lehčených žárovzdorných materiálů. Jde zejména o žárovzdornost, teplotu použitelnosti, součinitel tepelné vodivosti a objemovou hmotnost. To vše se zhodnotí v závislosti na chemickém složení popela, který vznikne vyhořením daného druhu pilin.

Klíčová slova

Lehčený šamot, lehčivo, piliny, popel, žárovzdornost, objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti

Abstract

Lightweight refractory products have their place between refractory materials. Still the most common way of lightweighting is by using burnable components. This bachelor work includes the theoretical part, which deals with raw materials for lightweight fireclay, manufactory, and also testing lightweight refractory products. The second part of this work deals with foreign research and its results in this area.

The practical part examines the influence of the types of sawdust (spruce or beech) on properties of lightweight refractory materials. The work focuses mainly on heat resistance, temperature usability, thermal conductivity, and density. These properties are evaluated with consideration to the ash which is created by burning sawdust.

Keywords

Lightweight fireclay, lightener, sawdust, ash, heat resistance, density, thermal conductivity

Bibliografická citace VŠKP

Veronika Smékalová *Vliv pilin na žárovzdornost lehčeného šamotu*. Brno, 2016. 56 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 22.5.2016

.....
podpis autora
Veronika Smékalová

Poděkování:

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Radomíru Sokolářovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

Obsah

1 Úvod	10
2 Cíl práce.....	11
3 Teoretická část	12
3.1 Žárovzdorná šamotová keramika	12
3.2 Lehčený šamot	13
3.2.1 Pojiva.....	14
3.2.2 Ostřivo.....	14
3.2.3 Přísady – lehčiva	15
3.3 Výroba lehčeného šamotu.....	15
3.3.1 Vytváření.....	15
3.3.2 Sušení	16
3.3.3 Výpal	17
3.4 Možnosti lehčení šamotu	17
3.5 Popel	19
3.5.1 Popel ze dřeva – faktory ovlivňující jeho chemické složení.....	19
3.6 Popel vzniklý vyhořením smrkových a bukových pilin.....	21
3.6.1 Smrk	21
3.6.2 Buk	22
3.7 Vlastnosti a zkoušení žáromateriálu	23
3.7.1 Žárovzdornost.....	23
3.7.2 Únosnost v žáru	24
3.7.3 Stanovení trvalých délkových změn v žáru (klasifikační teplota)	25
3.7.4 Tepelná vodivost	26
3.7.5 Objemová hmotnost, pórovitost, hustota, smrštění.....	26
3.8 Zahraniční publikace.....	27

3.8.1	Výroba anortitových žárovzdorných izolačních cihel ze směsi jílu, recyklovaného papíru a pilin	27
3.8.2	Získání lehčeného stavebního materiálu přidáním pilin a jejich vliv na mechanicko – fyzikální vlastnosti keramických cihel.....	31
3.8.3	Izolační žárovzdorné produkty bez šamotu (ostřiva)	34
3.9	Využití chemické přísady VUPPOR při výrobě lehčeného šamotu	36
3.9.1	VUPPOR	36
3.9.2	VUPPOR při výrobě lehčeného šamotu	36
4	Praktická část	41
4.1	Příprava surovin a vytvoření plastického těsta	41
4.2	Smrštění a objemová hmotnost	42
4.4	Chemické složení popela	45
4.5	Diferenčně kontrakční termická analýza (DKTA).....	46
4.6	Žárovzdornost	48
4.7	Součinitel tepelné vodivosti λ	49
5	Závěr	50

1 Úvod

Šamotové výrobky jsou v dnešní době jeden z nejrozšířenějších žárovzdorných materiálů. Využívá se v keramickém, sklářském, metalurgickém průmyslu, ale i jako vyzdívka rotačních pecí pro výrobu vápna či cementu. Na lehčený šamot je kladen požadavek, aby jeho objemová hmotnost byla nižší jak 1200 kg/m^3 z čehož plyne, že výrobek musí mít značnou pórovitost, čímž se zlepšují jeho tepelně izolační vlastnosti. K výrobě lehčeného šamotu jsou využívány žárovzdorné jíly na bázi systému $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Vytvoření pórovitosti v šamotovém keramickém střepu je možno provádět několika způsoby. Jedním z nejpoužívanějších způsobů lehčení je přidání vyhořívajících příměsí organického původu (piliny, rozemleté uhlí, odpad z papírenské výroby, apod.). Mezi další možnosti patří technologie napěnění vzduchem, přidavek lehčeného plniva (expandovaný perlit, drť z lehčeného šamotu), vývin plynných komponent chemickou reakcí, či přidavkem těkavých látek. [1,2,6]

Vzhledem k tomu, že zatím stále nejpoužívanější typ lehčení je přidání vyhořívající přísady, bude se tato práce věnovat pilinám a jejich využití v tomto odvětví. V praktické části budou vyrobené vzorky obsahovat určité množství smrkových či bukových pilin a na základě zkoušek se stanoví všechny potřebné vlastnosti daného keramického střepu

2 Cíl práce

Cílem práce je posoudit vhodnost tradičního vyhořívajícího lehčiva (pilin) pro výrobu žárovzdorných tepelně izolačních materiálů. Dřevěné piliny mohou výrazně ovlivňovat důležité vlastnosti keramického střepu jako například: klasifikační teplotu, žárovzdornost, únosnost v žáru, pórovitost, smrštění výpalem, součinitel tepelné vodivosti, objemovou hmotnost, obsah alkálií, apod.

Teoretická část práce se bude zabývat lehčeným šamotem. Zaměří se na suroviny potřebné pro výrobu lehčeného šamotového střepu (pojivo, ostřívo a lehčivo) a dále budou popsány zkoušky prováděné na těchto výrobcích. V rámci další části bude vypracována rešerše z již publikovaných zahraničních článků.

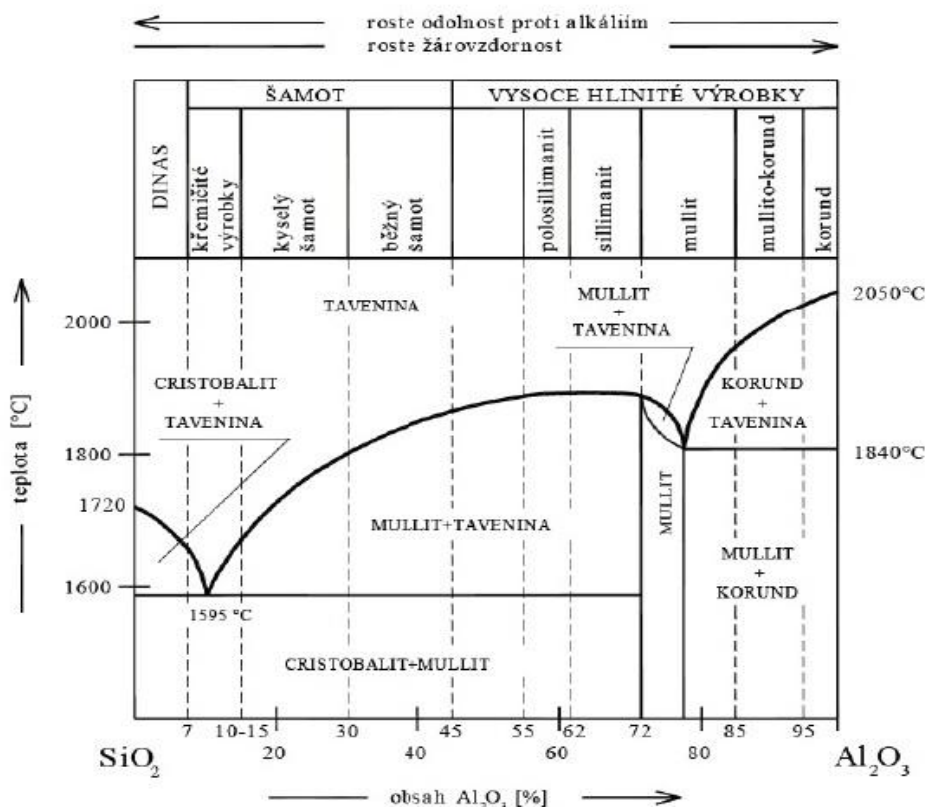
Praktická část posoudí vliv smrkových a bukových pilin na vlastnosti lehčených šamotů. Dále se bude věnovat obsahu alkálií v popelu a posoudí vliv těchto alkálií na výsledné vlastnosti šamotového střepu. na závěr bude provedeno vyhodnocení a cenové porovnání dle jednotlivých druhů pilin.

3 Teoretická část

3.1 Žárovzdorná šamotová keramika

Základním požadavkem na suroviny pro výrobu šamotu je nejen vysoká žárovzdornost, ale i dostupnost daných surovin (výskyt i množství) a samozřejmě cena. [1]

Šamotový keramický střep patří do systému na bázi aluminosilikátů. Právě na základě obsahu SiO_2 a Al_2O_3 hovoříme o šamotu. Obsah oxidu křemičitého v materiálu musí být nižší než 93 % a množství oxidu hlinitého zpravidla méně než 45 %. Mineralogicky je žádoucí mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), který je chemicky stabilní s vysokým bodem tání. Mullit dále může nabídnout relativně vysoké pevnosti, vyšší modul pružnosti a nízkou tepelnou roztažnost. Dále se v šamotu vyskytují skelné fáze. Identifikován je i cristobalit, ale u kvalitnějších šamotů je potlačen na minimum. [3, 6]



Obrázek 1 - Fázový diagram SiO_2 - Al_2O_3 [6]

Žárovzdornost těchto výrobků je definována žároměrkou 150, což představuje teplotu 1500 °C. Výrobky jsou extrémně namáhány a v keramice mají své nezastupitelné místo. Oproti klasické keramice mají žárovzdorné výrobky rozdílnou mikrostrukturu,

chemické i fyzikální vlastnosti a větší rozmanitost. Proto se často označují jako keramika speciální. [1, 6]

Šamot je oblíbený už jen kvůli své přizpůsobivosti do mnoha podmínek. Z toho je jasné, že šamotu se vyrábí velké množství druhů. Dají se rozdělit do třech kategorií: [6]

a) Obyčejný šamot – obsah Al_2O_3 je 30-45 % a zpravidla má velkou nasákavost a malou pevnost v tlaku. Používá se tam, kde vyzdívka není namáhána otěrem. [6]

b) Šamot s nízkým obsahem Al_2O_3 – obsah oxidu hlinitého je tady od 15 % do 30 %. Opět má relativně nízkou pevnost v tlaku a vysokou nasákavost. Používá se jako vyzdívky do pecí na pálení porcelánu (vyzdívka přichází do styku s taveninou, ale ne s otěrem). [6]

c) Šamot se zvýšeným obsahem Al_2O_3 (více jak 45%) – materiál, který je vysoce odolný proti deformacím v žáru. [6]

Všechny zmíněné druhy se dají vyrábět i jako lehčený šamot. [6]

3.2 Lehčený šamot

Jako lehčený šamot se označují výrobky, které mají objemovou hmotnost nižší jak 1200 kg/m^3 a zdánlivou pórovitost vyšší jak 45 %. Využívají se zejména jako tepelně izolační materiály. V dnešní době jsou kladeny vysoké nároky na úsporu energie a vede to k co možná největšímu snížení tepelných ztrát. K velkému úniku tepla (prostupy stěnami) dochází hlavně u pecí. Omezovat to můžeme právě lehčeným šamotem. Vytvoření pórovité struktury vede ke snížení objemové hmotnosti, což vede ke zlepšení tepelně izolačních vlastností. Ovšem na druhou stranu, tím že se sníží objemová hmotnost a zvýší pórovitost, dojde ke zhoršení mechanických vlastností. Proto se lehčené šamoty mohou kombinovat s hutnými šamoty, kdy hutné šamoty plní nosnou funkci a lehčené šamoty funkci izolační. [4,6]

Dle C.V. Gljebova se lehčené šamotové výrobky rozdělují podle využití: [5]

- Výrobky pro izolační vyzdívky, které jsou chráněny jinou vyzdívkou před stykem s plamenem z jedné nebo obou stran [5]

- Vyzdívka přímo přichází do styku s plamenem nebo je v žárovém pásmu [5]

Suroviny používané pro výrobu lehčeného šamotu jsou téměř stejné jako pro výrobu klasického šamotu, navíc se zde nacházejí lehčiva, díky kterým se radikálně zlepšují tepelně izolační vlastnosti. Suroviny dělíme na pojiva, ostřiva a přísady (taviva, lepiva, lehčící přísady).

3.2.1 Pojiva

Jíly a kaolíny patří mezi plastické složky hmoty. Podmínkou je, aby měly dostatečné množství kaolinitu, který výrobku dodává plastičnost a žárovzdornost. Velký důraz je kladen také na obsah alkalických oxidů, jako je Fe_2O_3 . Je to kvůli tomu, že snižují žárovzdornost. Kvalita je pak dána obsahem Al_2O_3 . Pro výrobu lehčeného šamotu se používají žárovzdorné kaolíny, jíly a lupky. [1,6]

Kaolín – tzv. plavené kaolíny (při plavení kaolínu vzniká odpad, tzv. šlika – křemen, slídy, živce, oxidy železa, atd.) obsahují velké množství čistého kaolinitu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), proto se využívají pouze na výrobu velmi kvalitních šamotů. Mají malé množství příměsí (1-1,5 %). [6, 7]

Jíly a lupky – jsou to usazené horniny. Pro použití do plastického těsta se musí nejdříve jemně umlít (jinak by nezískaly své plastické vlastnosti). Některé druhy lupků jsou dost pevné na to, aby se dali použít jako ostřiva. Opět se z hlediska mineralogického složení sleduje obsah kaolinitu. Co se chemického složení týče, jde hlavně o obsah Al_2O_3 (u nás jíly obsahují od 15 % do 45%). Oproti kaolínu mají jíly vyšší obsah příměsí a tedy i alkalických oxidů. Maximální obsah příměsí je 6 %, přičemž obsah Fe_2O_3 1 až 3 % (v závislosti na druhu výrobku). Nežádoucí je nejen oxid železitý, ale i příměsí železa jako pyrit či markazit. Způsobují při výpalu vytaveniny a nadýmání střepu. [4, 6]

3.2.2 Ostřivo

Ostřivo je nedílnou součástí výroby šamotu. Šamot nelze vyrobit pouze z jílu, protože při sušení a pálení by výrobek popraskal a zborčil se → nebylo by možné vytvořit požadovaný tvar. Snižuje tedy plastičnost hmoty, dále smrštění sušením i smrštění pálením. Může reagovat při výpalu s oxidy, které jsou obsaženy v dalších surovinách a vytvářet tak hutný střep. Nejčastěji se jako ostřivo používá pálený žárovzdorný jíl nebo lupek. Získá se vypálením na teplotu 1000-1400 °C (v závislosti na požadované

jakosti). Vzniká různé množství mullitu (při vyšší teplotě, vyšší množství → lepší kvalita), přičemž dalším výpalem již nedochází k žádným podstatným fyzikálně chemickým změnám. [2, 5, 6]

Ekonomicky výhodné je využívat výměty z vlastní výroby. Mohou to být nepovedené kusy výrobků, které se upraví na vhodnou zrnitost a použijí se dále jako ostřivo. Je to všestranně vhodné řešení – suroviny mají stejné složení a efektivně se využije materiál, který by byl jinak odpadem. [2, 6]

3.2.3 Přísady – lehčiva

Používají se pro snížení objemové hmotnosti respektive pro zlepšení tepelně izolačních vlastností. Lehčiva působí:

a) nepřímo – do směsi se přidávají suroviny s nízkou objemovou hmotností. Mohou to být přírodní (křemelina), odpadní (popílek, škvára) nebo upravená lehčiva (expandovaný perlit, vermikulit, keramzit). Velmi výhodné z hlediska tepelně izolačních vlastností jsou cenoféry, což jsou nejlehčí podíly popílku. [2,7]

b) přímo – látky, které při výpalu vyhoří, tzn. organické látky. Využívají se odpady jako dřevěné piliny, korková drť, papírenské kaly, koks, textil, rýžové slupky, atd. Důležité je sledovat obsah popela (nespalitelných látek), hlavně obsah alkálií. [2]

3.3 Výroba lehčeného šamotu

Je to složitý proces a proto je nutné znát veškeré chemické a fyzikální vlastnosti jednotlivých surovin. Na základě toho se může stanovit vytváření, sušení i pálení. [6]

3.3.1 Vytváření

Způsob výroby se stanovuje dle požadavků na vytvářený výrobek. Sleduje se požadovaná hutnost, obsah Al_2O_3 , mineralogické složení, atd. Hutnost a pevnost je dána lisovacím tlakem a samozřejmě vlastnostmi daných surovin. Abychom získali kvalitní výrobek, je nutné vytvořit hutný výlisek. [3]

Poměr ostřiva a pojiva určuje vytváření směsi. Pro lisování s plastického těsta se uvažuje 50-65 % ostřiva. Při výrobě z drolenky je obsah ostřiva 50-75 % a v případě tvrdých šamotů až 90 %. Co nejhutnější uspořádání částic získáme vhodně zvolenou zrnitostí – použije se více druhů frakcí. [3, 6]

a) Výroba z plastického těsta – množství vody přidané do tohoto těsta je 16-20 % (v závislosti na použitém lehkivu). Suroviny se nejdříve předemelou a předdrť a následně se melou společně (za mokra či za sucha) v kolových nebo válcových mlýnech. Poté se mísí v mísičích, která mohou být kolová nebo korytová. Tato směs se homogenizuje, případně se odvzdušní a nechá odležet. V dalším kroku se směs tvaruje do požadovaného tvaru. První možností je ručně, kdy se hmota dusá do dřevěných forem vyložených plechem po vrstvách elektrickými nebo pneumatickými pěchy. Ruční vytváření se využívá u výrobků složitých tvarů. Druhou možností je lisování nižšími tlaky (přelisování). Způsob má využití zejména pokud nelze vyrábět lisováním z drolenky nebo je vyžadován zvláštní vzhled. Dávkování je objemové, přetokové nebo odvažováním. [3, 4, 6]

Problémem u takto vytvářených výrobků může být nerovnoměrná hutnost, velké smrštění sušením a také náročnější manipulace s výlisky. Největší výhodou je pak možnost výroby rozmanitých tvarů i velkých výrobků. Lehčený šamot se vyrábí výhradně z plastického těsta. [3]

b) Vytváření z drolenky – obsahuje 3-10 % vody. V kolovém mísiči se promísí všechny potřebné suroviny a lisováním na mechanických nebo hydraulických lisech se vytvářejí do ocelových forem (dávkování objemově nebo odvažováním). Vzhledem k tomu, že hmota obsahuje velké množství ostřiva, ocelové formy se rychle opotřebovávají (tření se snižuje vyhříváním a vymazáváním forem). Tato skutečnost je velkou nevýhodou vytváření šamotu z drolenky. Většinou se takto vyrábí velkosériové výrobky a nebo výrobky s požadavky na vyšší kvalitu (nižší smrštění, vyšší odolnost proti změnám teploty). Důležitá je i nižší spotřeba energie vynaložená na sušení. [3, 4]

3.3.2 Sušení

Náročnost sušení ovlivňuje množství vody, které bylo do směsi přidáno. Požadavkem je, aby výlisky měly před uložením do pece minimální pevnost 1 MPa a maximální vlhkost 2 %. Výrobky tvořené z plastického těsta jsou náchylnější (vzhledem k vyššímu množství vody) ke smrštění sušením, proto by mělo probíhat pomaleji. Pevností po vytvoření výlisku jsou malé, musí se před výpalem předsušit. Jsou samostatně uloženy na podložkách a suší se v tunelových, komorových nebo

velkoplošných sušárnách. Po vysušení je již jejich manipulační pevnost dostatečná, a tudíž není problém s překládáním výrobků do pece. [3, 6]

Výrobky tvořené z drolenek se často suší přímo na pecních vozech (uloží se na ně hned po vylisování) v komorových nebo kanálových sušárnách. Jednotlivé vrstvy se prosypou pískem, aby se výrobky při výpalu nespekly. [3]

3.3.3 Výpal

Výpal je důležitým krokem pro získání požadovaných vlastností výrobku. Dochází při něm k různým chemickým a fyzikálním změnám. Teplota vypalování se pohybuje od 950 °C do 1500 °C a probíhá v komorových nebo tunelových pecích. Tunelové pece se využívají u výrobků, které se vyrábí velkosériově. Komorové pece jsou pracnější na obsluhu (nakládání a vykládání materiálu). Doba výpalu se jednoznačně určit nedá. Závisí na typu, velikosti a tvaru výrobku, dále na možnostech pece a maximální teplotě výpalu. [3, 6]

3.4 Možnosti lehčení šamotu

Žárovzdušné výrobky se dle normy ČSN EN 1094-2 dělí dle objemové hmotnosti a klasifikační teploty (teplota, při níž se trvale změni délkové rozměry výrobku o více než 2 %). Skutečná pórovitost rozděluje výrobky na lehké (L) s pórovitostí do 75 % a ultralehké (U) – pórovitost nad 75 %. [6]

Možné způsoby pro vytvoření pórovitosti:

a) Přídavkem vyhořívající příměsi – vytváření s přídavkem vyhořívajících příměsí probíhá z plastického těsta nebo lisováním. Při tvoření hmoty z plastického těsta se nejčastěji přidávají piliny nebo jiné dřevěné odpady.

- Piliny – jsou odpadem z dřevěného průmyslu. Vzhledem k tomu, že z používaného dřeva se změní pouze asi polovina na produkt, je velmi důležité využití vedlejších produktů, jako jsou piliny.

Problémem je, že dokážou pojmout velké množství vody, bobtnají a to způsobuje nepříjemnosti při sušení. Konkrétně jde o to, že dochází k nerovnoměrnému sušení a tudíž k deformaci výrobku. Piliny se klasicky dávají do 30 % (objemově). Nejčastěji se používají pro výrobu lehčeného

šamotu piliny smrkové, avšak v dnešní době dochází k experimentům s používáním například bukových pilin. Sleduje se ovlivnění vlastností lehčených keramických výrobků v závislosti na druhu použitých pilin. Piliny se kombinují i s jinými druhy lehčiv, například s papírenskými kaly nebo uhelnatými materiály. [1, 6, 9]

Piliny přidávané do šamotu mají velikost zrna do 3 mm (podíl do 5 mm maximálně 3 % a zrna pod 0,5 mm maximálně 45 %). Jíl působící jako pojivo se také mele tak, aby obsahoval minimálně 70 % zrn o velikosti menší než 0,5 mm. Směs se zpravidla mísí v kolových mísidlech. Sušení a výpal probíhá na základě toho, o jaký výrobek se jedná. [5]

Při vytváření výrobku z lisování se jako lehčiva využívají uhelnaté materiály.

- Uhelnaté materiály (koks) – používají se při vytváření polosuchým lisováním. Tyto materiály vyhořívají pomaleji oproti pilinám a může se vyskytovat zejména uprostřed výrobku nevyhořelá lehčiva. To se dá eliminovat přidávkem 3- 5 % pilin. [6]

Obecně se lehčiva dávkuje maximálně do 50 % objemu směsi. Větší množství lehčiv již nemá význam, protože tepelně izolační vlastnosti se nijak výrazně nevylepší, za to mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu) se zhoršují → jejich hodnoty se snižují. [6]

b) Napěnění vzduchem – Princip je založen na odlévání napěněné suspenze žárovzdorného šamotu a jílu s pěnotvornou látkou do kovových forem. Možností je i vytvoření pěny mimo a následné vmíchání do směsi. Pórovitost těchto výrobků je až 90 %, přičemž největším problémem je stabilizace pěny. Řešením jsou stabilizátory jako např. truhlářský klič, želatina, sulfátový louh, agar – agar a další organické látky a ochranné koloidy. Zajímavé je, že se pro stabilizaci používají například i piliny či pórovitý šamot a to z toho důvodu, že odnímají směsi vodu a tím usnadňují sušení. [1,4]

Sušení je u této technologie složitou částí, protože vlhkost se z výrobku může dostávat pouze jednou plochou → sušení je časově náročné a navíc objemové smrštění dosahuje až 50 % (největší smrštění je na výšku). Výrobek se po výpalu musí obrousit do požadovaného tvaru. [1]

Výrobky s vytvořením pórovitosti napěněním je technologicky náročné vyrobit a mají horší tepelně izolační vlastnosti, avšak výhodou jsou jejich podstatně vyšší pevnosti. [1]

c) Materiály lehčené plynem z chemických reakcí – napěnění plynem je způsobeno chemickou reakcí přítomných nebo přidaných látek. Nejen že tyto látky spolu reagují a tvoří bublinky, ale zároveň je i rozšiřují, promíchávají a stabilizují. Mohou spolu reagovat uhličitany a kyseliny (uvolňování CO₂), zásady a kyseliny (vývin plynů), kovy a kyseliny či zásady (vývin H₂), organické sloučeniny, atd. [1,6]

d) Materiály s přidavkem těkavých látek – do směsi se přidávají organické látky, které se odpařují či sublimují vlivem stoupající teploty. Postup je obdobný jako u vyhořívání přísad s tím rozdílem, že zde látka nejdříve vytěká v celém množství a shoří obvykle mimo výrobek. Při výpalu je nutné používat asanační zařízení, v kterém se produkty rozkladu dodatečně spalují a nedochází ke znečišťování životního prostředí škodlivinami. Jako těkavé látky se využívá naftalen, parafin a nejčastěji pěnový polystyren. Látky obvykle těkají a rozkládají se za mírně zvýšených teplot. [1,6]

Další možností je přidání lehčeného plniva (perlit, dutý kuličkový korund, drť z lehčeného šamotu) nebo kombinace různých způsobů vylehčování. [1,6]

3.5 Popel

Popel v keramickém střepu vzniká po vypálení dřevěných pilin. Popel vzniklý z každého druhu pilin má značné rozdíly, což se chemického složení týče. Proto každý druh pilin může ovlivňovat keramický střep do značné míry jinak.

3.5.1 Popel ze dřeva – faktory ovlivňující jeho chemické složení

a) Popel z jednotlivých částí stromů – bylo zjištěno, že popel vzniklý z určitých částí stromů (větve, kořeny, kmen, apod.), má rozdílné chemické složení. Obecně bylo zjištěno, že kořenové části a větve jsou na chemické prvky bohatší, než kmen. Kůra a zeleň mají opět velmi rozdílné hodnoty než ostatní části. [14]

b) Vliv druhu dřeviny na chemické složení – několik významných autorů (Someshwar, Hakkila, Lumme, Laiho) sledovalo účinky vlivu dřeviny na chemické složení popela. Všechny dostupné výsledky jsou shrnuty v následující tabulce 1. [14]

Tabulka 1 - Koncentrace chemických prvků v jednotlivých druzích dřeva v mg/kg [14]

Jehličnany				Listnáče				
Prvky	Borovice Banksova	Borovice	Jedlovec západní	Bříza	Javor	Topol osikovitý	Dub červený	Dub bílý
Al	33,3	4,7	11,1	0,0	20,1	1,4	6,8	ND
Ca	387,4	290,5	421,7	466,0	401,7	211,7	365,8	313,5
Fe	35,0	5,8	9,1	20,3	11,9	2,6	NM	0,9
K	22,5	162,4	25,3	36,3	31,9	112,5	60,8	102,5
Mg	33,2	70,3	79,0	25,3	117,0	35,5	52,0	75,7
Mn	39,0	40,4	19,0	47,0	27,0	1,4	14,9	1,4
Na	23,0	0,6	8,2	9,6	16,3	0,6	0,8	ND
P	12,2	8,4	9,2	12,6	4,8	11,8	15,6	5,6
S	10,4	10,7	5,6	12,8	5,6	7,0	18,0	12,1
Si	74,8	ND	46,7	14,0	46,3	1,1	ND	1,3

NM = neměřeno, ND = nenalezeno

Jak je z tabulky 1 patrné, kolísání chemického složení mezi jednotlivými druhy dřevin je velké. Proto byla Hakkilou sestavena obecná tabulka 2 pro tvrdá a měkká dřeva. [14]

Tabulka 2 - Rozdíl chemického složení mezi tvrdým a měkkým dřevem [14]

Prvek [%]	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	S	B	Cu
Měkké dřevo	2,7	12,0	22,8	3,8	2,5	0,7	0,3	2,0	0,05	0,04
Tvrdé dřevo	3,9	18,0	21,4	3,3	0,7	0,5	0,3	1,8	0,05	0,04

c) Popel vzniklý při různé vypalovací teplotě – obecné zjištění této studie je, že se zvýšenou teplotou dochází k hmotnostnímu snižování popela. Bylo to zkoumáno na pěti druzích dřeva (topol, borovice, dub bílý, dub červený a liliovník) a na teplotách od 500 °C do 1400 °C. [14]

V rozsahu teplot 538 °C až 1093 °C došlo ke snížení množství popela o 45 %. Je to přičítáno rozkladu uhličitanu vápenatého, který se rozkládá mezi teplotami 650-900 °C a také uhličitanu draselného, který se rozkládá při vyšších teplotách. Obecně bychom mohli říct, že se hmotnost K, S, B a Cu snižuje se zvyšující teplotou výpalu. Prvky jako Mg, Mn, P, Al, Fe a Si se s teplotou nijak výrazně nemění. Při teplotě okolo 1300 °C byly identifikovány hlavně CaO, MgO a oxidy kovů. Další zobecnění je náročné, protože hmotnostní úbytek popela se měnil zejména v závislosti na množství Fe, Al, Mn a Si (všechny tyto prvky mohou tvořit kyselé oxidy v kombinaci s alkáliemi). [14]

Faktorů, které ovlivňují chemické složení popela, bychom našli ještě celou řadu. Je to například způsob vypalování, kterým se popel získává, radioaktivními prvky v popelu, vytvářením granulí z popela, atd. Není nutné to nijak dále rozvíjet, protože popel v šamotu vzniká vyhořením pilin. [14]

3.6 Popel vzniklý vyhořením smrkových a bukových pilin

Pro praktickou část této práce budou použity smrkové a bukové piliny. Proto je nutné zjistit o těchto dvou dřevinách bližší informace.

3.6.1 Smrk

Smrk je nenáročný strom, který se u nás běžně vyskytuje. Zaujímá asi 53 % lesní půdy. Smrkové dřevo je nejčastěji využívaným průmyslovým dřevem. Může být ve formě kulatiny, polen, štěpek, pelet, briket nebo pilin. [16]

Při vyhořívání smrkových pilin vzniká malé množství popela. Poměrně vysoký hodnot nabývá obsah těžkých kovů v popelu. Chemický rozbor smrkového popela je uveden v tabulce 3. [16]

Tabulka 3 - Chemický rozbor popela vzniklého vyhořením smrkového dřeva [%_{hmotnosti}] [16]

P ₂ O ₅	3,53	CaO	43,5	MnO	3,780	Hg	<0,001
Al ₂ O ₃	2,66	K ₂ O	9,24	Cl	0,490	Cr	0,120
Na ₂ O	0,59	Fe ₂ O ₃	1,53	Pb	0,023	Ni	0,780
SO ₃	2,15	MgO	6,68	Cd	0,001	V	Nenalezen
SiO ₂	8,5	TiO	0,18	Cu	0,038	Zn	0,140

Teplota tání smrkového popela je 1257 °C. [16]

Dřevo smrkové je u nás jedno z nejdostupnějších, díky hojnému výskytu. Cena štěpek je kolem 1900 Kč/t, za piliny zaplatíme od 200 Kč/m³ do 350 Kč/m³(cena se odvíjí od lokality a vlhkosti pilin). [16]

3.6.2 Buk

V České republice se buk nachází hlavně v podhorských a horských oblastech. Dříve byl výskyt buku v ČR mnohem vyšší, než je teď. Dřevinná skladba lesů ukazuje, že buku je pouze 5,9 %. Bukové dřevo patří mezi kvalitní dřevo a nejčastěji je využíváno ve formě polen. [15]

Oproti smrkovému popelu obsahuje bukový popel poměrně málo těžkých kovů (umožňuje používat popel pro hnojení). Kompletní chemický rozbor je proveden v tabulce 4. [15]

Tabulka 4 -Chemický rozbor popela vzniklého vyhořením bukového dřeva [%_{hmotnosti}] [15]

P ₂ O ₅	-	CaO	7,92	MnO	0,45	Hg	<0,0001
Al ₂ O ₃	9,77	K ₂ O	6,20	Cl	4,28	Cr	0,08
Na ₂ O	1,38	Fe ₂ O ₃	9,98	Pb	0,02	Ni	0,05
SO ₂	0,12	MgO	2,34	Cd	<0,0001	V	-
SiO ₂	56,3	TiO	0,5	Cu	0,0	Zn	0,1

Teplota tání smrkového popela je 1280 °C. [15]

Bukové dřevo je ceněným palivem, proto i cena je vyšší. Bukové piliny vyjdou zhruba na 350- 450 Kč/m³ i více.

3.7 Vlastnosti a zkoušení žáromateriálu

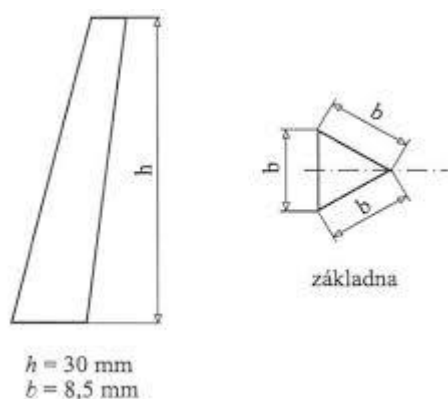
Při využívání tradičního vyhořivajícího lehčiva (dřevěných pilin) pro výrobu žárovzdorných tepelně izolačních materiálů, je nutné sledovat vlastnosti žáromateriálu jako klasifikační teplotu, žárovzdornost, únosnost v žáru, pórovitost, apod. Zkušební metody izolačních výrobků se zkouší dle normy ČSN EN 1094.

3.7.1 Žárovzdornost

Materiál je žárovzdorný pokud dokáže odolávat vysokým teplotám. Určuje se tak, že se ze zkoušeného materiálu vytvoří tzv. žároměrky. Jsou to tělíska ve tvaru komolého kužele, se stejnými rozměry a tvary jako referenční žároměrky. Každé referenční žároměrce odpovídá referenční teplota (teplota, při níž se vrchol žároměrky dotkne podložky, na které je připevněna). Označování je dle normy ČSN EN 993-13. [2]

Tabulka 5 - Označení žároměrek a referenční teploty [2]

Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]
150	1500	162	1620	172	1720
152	1520	164	1640	174	1740
154	1540	166	1660	176	1760
156	1560	168	1680	178	1780
158	1580	170	1700	180	1800
160	1600				



Obrázek 2 - Rozměry referenčních žároměrek [1]

Zkouška se provádí dle ČSN EN 993-12. Dle předpokládané žárovzdornosti výrobku či materiálu si volíme referenční žároměrky a následně je všechny připevníme pomocí tmele na žárovzdornou podložku. Umísťují se do kruhu (nebo dvou řad) v pořadí žároměrek: zkušební, referenční o stupeň nižší, referenční, zkušební, referenční

o stupeň vyšší, referenční. Teplota v peci by za 1,5-2,0 hodiny měla být zhruba o 200 °C nižší, než se očekává teplota žárovzdornosti a následně se zvyšuje o 2,5 °C za minutu. Žárovzdornost je stanovena ve chvíli, kdy se obě žároměrky (zkušební i referenční) dotknou svým vrcholem podložky. Na základě znalosti referenční teploty dané referenční žároměrky můžeme stanovit žárovzdornost. [2]

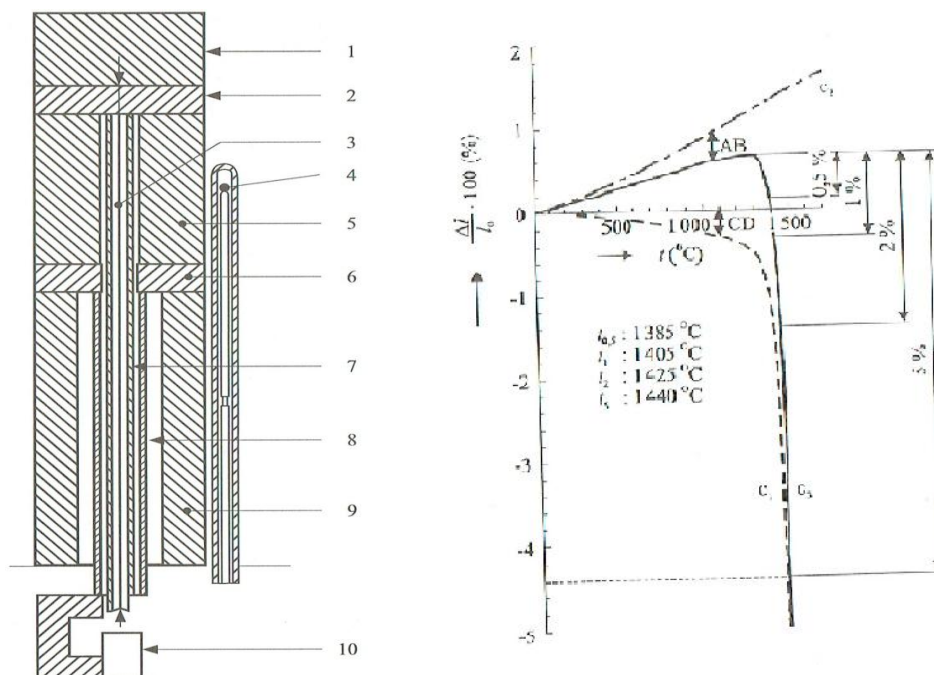
V dnešní době je tento způsob již zastaralý a spíše se ke stanovení žárovzdornosti používají pece, které mají otvor pro sledování žároměrek. V ideálním případě je u otvoru kamera, která je propojena s PC a celý proces se sleduje na obrazovce počítače.

3.7.2 Únosnost v žáru

Charakterizuje chování výrobku v žáru, tedy odolnost proti deformaci v žáru při zatížení. Je to vlastně teplota, při níž dojde k danému stupni deformace či náhlému rozrušení zkušebního tělesa při stejném zatížení a teplotě stoupající dle normy. Zkouškou se simulují podmínky při využívání žárovzdorných materiálů namáhaných tlakem. Hodnoty únosnosti v žáru jsou ovlivněny mnoha faktory, např: množstvím a viskozitou kapalné fáze (při dané teplotě), zrnitostí, strukturou, texturou, atd. [1.2]

Při stanovování únosnosti v žáru je třeba dodržovat rychlost zahřívání. Pokud by rychlost byla vyšší než je stanovena rychlost zahřívání, výsledky by byly zkresleny (obecně vyšší rychlost zahřívání → vyšší deformační teploty). [1]

Zkoušení (dle ČSN EN 993-8) probíhá na válečku o výšce a průměru 50 mm, do kterého je vyvrtán souosý otvor o průměru 12-13 mm. Takový váleček se vyrobí vybroušením vzorku. Váleček se umístí do trubkové vertikální odporové pece s definovaným nárůstem teplot. Zatěžovací tlak působící na váleček je předepsán na 0,2 MPa u hutných materiálů a 0,05 MPa u tepelně izolačních materiálů. Do otvoru válečku jsme umístili termočlánek, který měří teplotu. V krátkých časových úsecích se zapisují změny délky válečku a teplota. Těleso zatěžujeme do dané teploty nebo do chvíle, kde je stlačení vzorku vyšší jak 5 % z počáteční výšky. Pro závěrečné vyhodnocení se sestavuje křivka závislosti relativní změny výšky vzorku na teplotě. Výslednou křivku C_3 získáme úpravou změn výšky a zkušebního tělesa C_1 a změn délky vnitřní korundové trubice C_2 . Na výsledné křivce se vyznačí body, při nichž je deformace výšky tělesa 0,5 %, 1 %, 2 % a 5 % a přiřadí se k nim odpovídající teplota. [1, 2]



Obrázek 3 - Měřicí přístroj na stanovení únosnosti v žáru (měřicí zařízení umístěno pod zkušební tělesem) a příklad měření skutečné deformace (obrázek vpravo) [1]

3.7.3 Stanovení trvalých délkových změn v žáru (klasifikační teplota)

Vyjadřují zvětšení nebo zmenšení rozměru výrobku vypáleného na teplotu 800 °C (hutné výrobky) nebo 750 °C (izolační výrobky) a vyšší. Stanovuje se zkouškou, založenou na teplově výpalu, teplotní výdrže a ochlazení na laboratorní teplotu. Příčina objemových změn výrobků v žáru je nedostatečná teplota a výdrž při jejich výpalu. Zvýšení teploty někdy nemůže být provedeno kvůli měknutí či deformaci výrobků. Dalším důvodem mohou být ekonomická kritéria nebo technický stav pecí. Poslední možností je i špatné teoretické poznání. [1,2]

Pro jednotlivé druhy žárovzdorných výrobků udává podmínky zkoušení norma ČSN EN 993-10. Na zkušebních tělesech ve tvaru válce se zkouší hutné výrobky ($\varnothing=50$ mm, výška je 60 mm) a na hranolech (100x114x74(64)) se zkouší izolační výrobky. Tyto vzorky se vyříznou ze zkušební tělesa, vysuší se a změří jejich rozměry. Následně vzorky umístíme do pece a zahříváme předepsanou rychlostí na požadovanou teplotu. Tato teplota se podrží požadovanou dobu (hutné výrobky obvykle 5 hodin, izolační výrobky 12 hodin). Po vytáhnutí vzorku z pece ho necháme v laboratorních podmínkách vychladnout a znovu změříme těleso. Ze změn vypočteme trvalou délkovou změnu, která může být kladná (dodatečný nárůst) nebo záporná (dodatečné smrštění). [1,2]

K této zkoušce se váže pojem klasifikační teplota. Obecně je to teplota, při které dosáhnou trvalé délkové změny při dané expozici určitou hodnotu. [1]

3.7.4 Tepelná vodivost

Hodnota tepelné vodivosti je množství tepla, které projde materiálem o dané tloušťce za jednotku času, přičemž teplota se změní právě o 1 teplotní stupeň. Vyjadřuje se součinitelem tepelné vodivosti λ . V případě tepelně izolačních materiálů by měl být co nejmenší. Tepelná vodivost je závislá na objemové hmotnosti. Čím je objemová hmotnost menší (větší počet pórů), tím je součinitel tepelné vodivosti nižší.

Součinitel tepelné vodivosti lze zjišťovat metodou topného drátu (ČSN EN 993-14 nebo ČSN EN 993-15). Vzorek zahřejeme v peci na požadovanou teplotu, při které se udržuje. Následně se místně zahřeje topným vodičem, který je vložený ve vzorku a připojený ke zdroji elektrického proudu (známý výkon v daném čase a rovnoměrný výkon v celém tělese). Výsledky se stanoví na základě toho, kterou metodu topného drátu využíváme. V dnešní době se využívá ke stanovení součinitele tepelné vodivosti sonda, která se přiloží na vybroušený povrch vzorku, nechá se pracovat a následně vyhodnotí přímo součinitel tepelné vodivosti. Stále je to metoda založená na metodě topného drátu. [2]

3.7.5 Objemová hmotnost, pórovitost, hustota, smrštění

a) Objemová hmotnost – u izolačních materiálů se stanovuje vážením suchého vzorku a objem se stanovuje měřením zkoušeného tělesa. Značí se ρ [g/cm³]. [2]

b) Pórovitost:

- Zdánlivá – je to poměr objemu otevřených pórů ku celkovému objemu [8]
- Skutečná – poměr otevřených i uzavřených pórů ku celkovému objemu [8]

c) Hustota – jde o poměr hmotnosti suchého vzorku k jeho skutečnému objemu (bez pórů). Stanovení probíhá pyknometricky (vzorek má zrnitost do 0,63 μ m) [2]

d) Smrštění sušením, pálením a celkové – je to délková a objemová změna vzorků, kdy dochází k přibližování částic vlivem různých faktorů. Stanovují se na základě stavu vzorku před procesem a po procesu. Celkové smrštění je hodnota udávající změnu rozměru od vytvoření vzorku (ať už z jakéhokoliv těsta) až po rozměry vzorku po vypálení. [8]

3.8 Zahraniční publikace

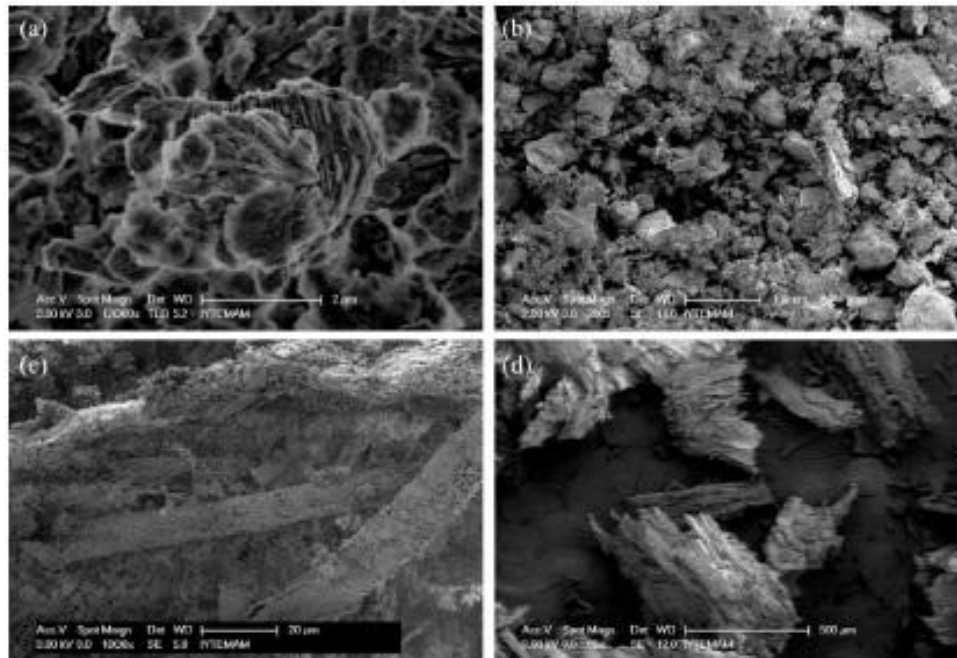
3.8.1 Výroba anortitových žárovzdorných izolačních cihel ze směsi jílu, recyklovaného papíru a pilin

Izolační tvarovky tvoří jednu ze žárovzdorných skupin, které jsou používány pro tepelnou izolaci. Jsou vysoce pórovité, lehké, žárovzdorné materiály s nízkou tepelnou vodivostí. Rozdíly mezi jednotlivými typy izolačních cihel jsou především v použitých surovinách pro výrobu (křemelina, perlit, expandovaný vermikulit, křemičitan vápenatý, šamot, kaolín, křemen oxid hlinitý, atd.). [9]

Pórovitost, která je nerozpojitelně spjatá s izolačními tvarovkami je často vytvořena přidáním vyhořívajících látek do surovinové směsi. Pro vytváření pórů jsou různé možnosti – piliny, pěnový polystyren, jemný koks, pojiva a organické pěny, dále pak i zrnité materiály (duté mikroskopické kuličky a bubliny oxidu hlinitého). Izolační materiály se dle normy dělí dle objemové hmotnosti a maximální provozní teploty. Anortitové izolační cihly jsou vyráběny především ze směsi jílu, sádrového pojiva a pilin. Problémem této metody z hlediska životního prostředí je uvolňování sloučeniny síry ze sádry, což je vysoce nežádoucí. V dřívějších výzkumech se žárovzdorný izolační materiál vyráběl ze směsi kaolínu, sádrového pojiva a materiálu pro vytvoření pórovitosti (perlit, piliny, polystyren). Ovšem dnes se výzkum zaměřuje na využití odpadního papíru z průmyslu. Tato nová surovinová složka má za úkol vytvořit mikropóry v důsledku spalování celulósových vláken a rozkladu uhličitanu vápenatého, přičemž přidáním pilin zaručíme vytvoření makropórů. [9]

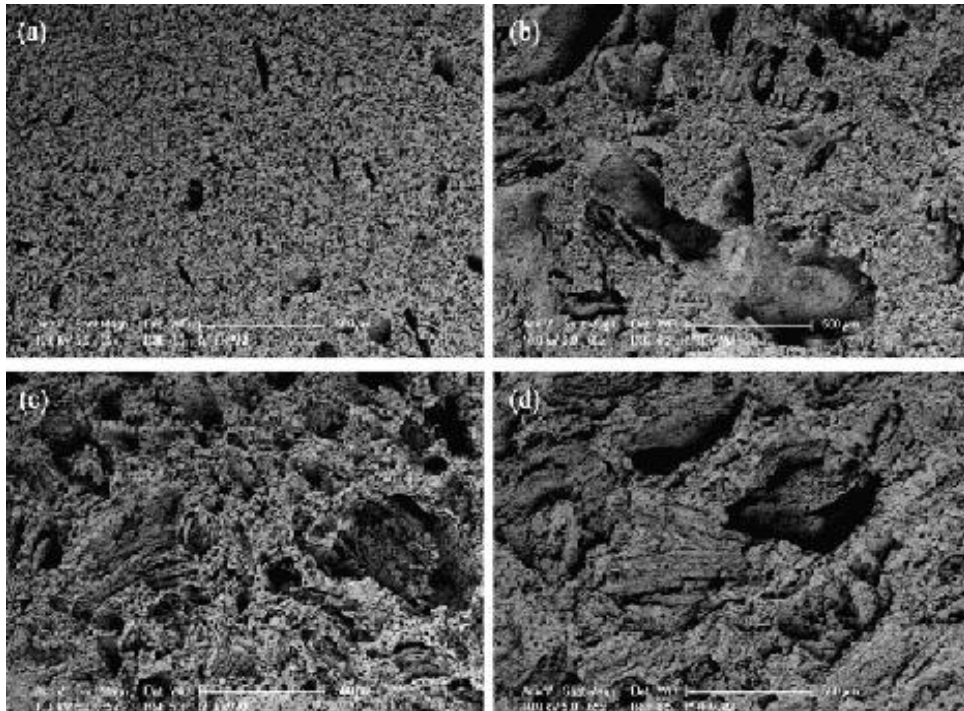
Výroba izolačních tvarovek se prováděla z odpadního papíru, dvou různých jílu a pilin. První jíl je K244 (Katemaden, Turecko) a druhý je šamot (Eczacibasi esan, Turecko). Do směsi byly přidány díky jejich chemickému složení – obsahují SiO_2 (ostřivo) a Al_2O_3 (žárovzdornost). Recyklovaný odpadní papír byl použit jako zdroj oxidu vápenatého k dosažení anortitové syntézy (CaO , Al_2O_3 a SiO_2). Dále má nenahraditelnou roli v tvorbě pórů při výpalu (díky celulósovým vláknům a obsahu CaCO_3). Do směsi jsme přidávali 10, 20 nebo 30 hmotnostních procent pilin o zrnitosti do 3 mm. Vzorky byly vytvářeny litím. Recyklovaný odpadní papír (ve formě kalu) se rozptýlil ve vodě spolu s jílem a následně se přidaly piliny. Obsah vody ve směsi byl mezi 55 % až 66 % (v závislosti na množství přidávaných pilin). Směs se odlévala do sádrových forem (sádrovec odsál přebytečnou vodu). Zhruba po dvou

hodinách se vzorky odformovaly a ponechaly se sušit za normální vlhkosti (24-72 hodin v závislosti na jílu). Konečná část sušení probíhala v sušárně (12 hodin na 50 °C a následně 24 hodin na 100 °C). Teplota výpalu jílu K 244 byla 1200 °C, šamotu pak 1300 °C. [9]



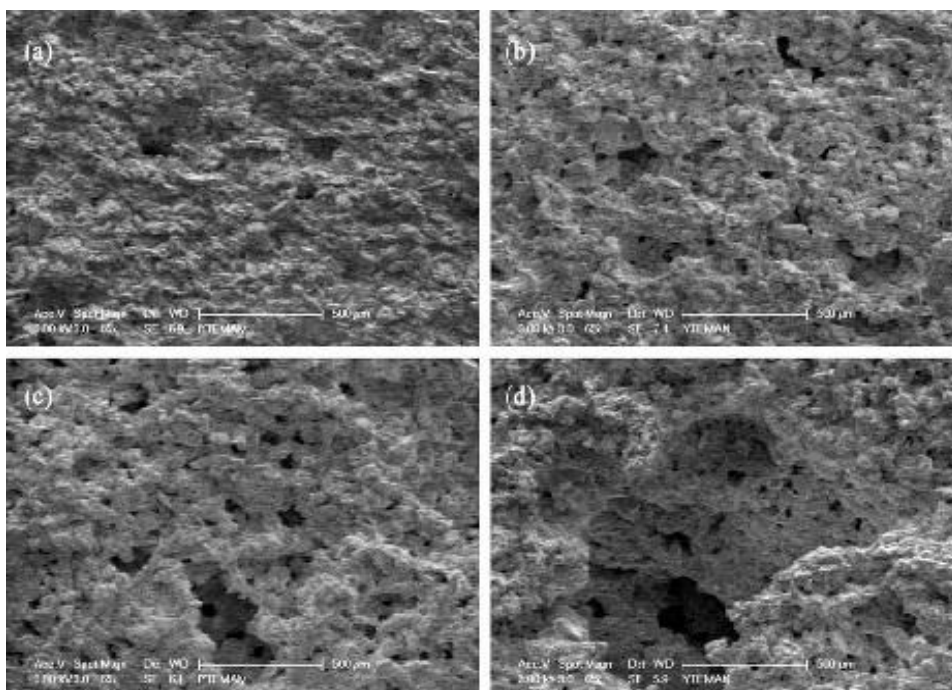
Obrázek 4 - Různé zvětšení surovin na rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM) – a) Jíl K244, b) Šamot, c) Odpadní papír, d) Piliny [9]

a) Použití jílu K244 – Vzorky byly vypalovány na teplotu 1200 °C, přičemž se předpokládá, že teplota bude mírně vyšší vlivem vyhořívání pilin. Pórovitost stoupala spolu s přidavkem pilin. Tepelná vodivost se také zlepšovala s vyšším množstvím pilin. Smrštění vzorků při výpalu bylo až 4,5 %. Co se týče pevnosti v tahu, tak ta se rapidně snižovala se zvyšujícím se podílem pilin. Na rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM) je možné vidět vzorky s různým množstvím lehčiva. Kombinací pilin a odpadního papíru vzniklo rozmanité množství mikropórů i makropórů. [9]

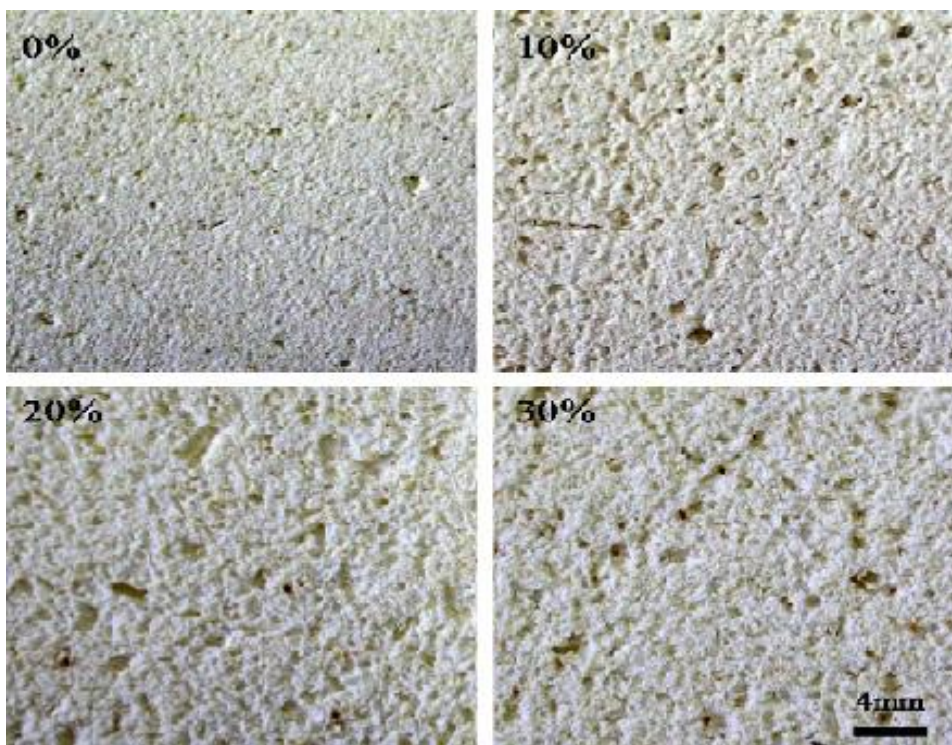


Obrázek 5 - Snímky z SEM s jílem K244 a různým množstvím pilin - a) 0 % pilin, b) 10 % pilin, c) 20 % pilin, d) 30 % pilin [9]

b) Použití šamotu – Vzorky byly vypalovány na dvě teploty a to 1200 °C a 1400 °C. Ukázalo se, že 1200 °C je málo pro vytvoření anortitu. Teplota výpalu 1400 °C již účinně dokáže vytvořit anortit. Nicméně tato teplota je blízko k teplotě tání anortitu (1553 °C) a navíc se předpokládá, že piliny budou teplotu v peci zvyšovat – výpal byl proveden na 1300 °C. Vzorky pak kromě anortitu obsahovaly i menší množství mullitu. Zdánlivá pórovitost se opět zvyšovala s rostoucím množstvím pilin. Oproti směsi s jílem K244 byla pozorována výrazně vyšší pórovitost. Hodnoty tepelné vodivosti se výrazně zlepšily s vyšším množstvím pilin, avšak to se velmi výrazně projevilo na pevnostech v tahu, které jsou nízké. Vzorky byly po všech stránkách stabilní do teploty 1100 °C, to znamená, že tato cihla může být bezpečně použitelná do této teploty. Na závěr se prováděly testy teplotním šokem (opakované chlazení a ohřevy). Vzorky uspěly – nebyly nijak porušeny. [9]



Obrázek 6 - Snímky z SEM s šamotem a různým množstvím pilin - a) 0 % pilin, b) 10 % pilin, c) 20 % pilin, d) 30 % pilin [9]



Obrázek 7 - Snímky ukazující množství a velikost pórů s různým množstvím pilin (směs s šamotem)

Přesné získané hodnoty jednotlivých směsí jsou shrnuty v následujících tabulkách 6 a 7.

Tabulka 6 - Výsledky zkoušek vzorků s jílem K244 [9]

Jíl K244				
Množství pilin [%]	0	10	20	30
Sypná hmotnost [g/cm ³]	1,30 ± 0,02	1,09 ± 0,02	0,93 ± 0,03	0,87 ± 0,06
Zdánlivá pórovitost [%]	48,2 ± 0,5	55,5 ± 0,5	57,0 ± 1,0	57,5 ± 0,5
Tepelná vodivost [W/(m·K)]	0,39 ± 0,01	0,30 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,20 ± 0,01
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	15,3 ± 1,2	7,04 ± 0,8	4,97 ± 0,5	4,49 ± 0,5

Tabulka 7 - Výsledky zkoušek vzorků se šamotem [9]

Šamot				
Množství pilin [%]	0	10	20	30
Sypná hmotnost [g/cm ³]	1,12 ± 0,04	0,92 ± 0,02	0,75 ± 0,01	0,64 ± 0,00
Zdánlivá pórovitost [%]	56,9 ± 0,5	64,7 ± 0,4	71,8 ± 0,2	74,1 ± 0,1
Tepelná vodivost [W/(m·K)]	0,25 ± 0,00	0,19 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,13 ± 0,00
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	2,74 ± 0,23	1,84 ± 0,11	1,1 ± 0,10	0,61 ± 0,10

Tato práce došla k závěru, že kombinace pilin a odpadního papíru lze použít jako alternativní surovinu pro výrobu anortitových izolačních žárovzdorných tvarovek. Hodnoty pevností, kterých bylo dosaženo, jsou sice nízké, ale i tak jsou dostačující pro izolační cihly. Vzorky s jílem K244 měly vyšší sypné hmotnosti i tepelné vodivosti než šamot. To je způsobeno obsahem alkálií v jílu.

3.8.2 Získání lehčeného stavebního materiálu přidáním pilin a jejich vliv na mechanicko-fyzikální vlastnosti keramických cihel

Jak je patrné z textu výše, v dnešní době se velmi lpí na recyklaci materiálů. Je snahou začlenit co nejvíce odpadů do dalšího využití. Mohou to být: odpad z výroby kaučuku, vápencový prach, piliny, odpady čaje, popílek, polystyren, kalové odpady, atd. Poptávka po tepelně izolačních materiálech roste, není tedy problémem tyto odpady využít. V tomto odvětví se jedná zejména o vyhořívající materiály, které vytvoří póry – piliny, polystyren, uhlí, papír, kal, koks, atd. [10]

Tento výzkum se zaměřuje na použití pilin eukalyptu a alep borovice do cihlové směsi. Chemické složení pilin je 60,8 % uhlíku, 5,19 % vodíku, 33,83 % kyslíku a 0,9 % dusíku. Suché dřevo je složeno z celulózy, ligninu, hemicelulózy a část cizorodých materiálů. [10]

Studie se zabývá vytvořením směsi ze dvou jílu, tuf a pilin. Vytvářely se 3 směsi s každým druhem pilin. Každá měla určité množství hmotnostních pilin (3 %, 6 % a 9 %) s částicemi o průměru od 0,5 mm do 1,6 mm. Tufy se do směsi přidávaly kvůli vysokému obsahu Al_2O_3 a SiO_2 . Vlhkost směsi byla od 22 % do 26 %. Teplota výpalu opět závisí na množství pilin ve směsi a pohybuje se od 850° do 950 °C. [10]

Tabulka 8 - Chemické složení surovin v % [10]

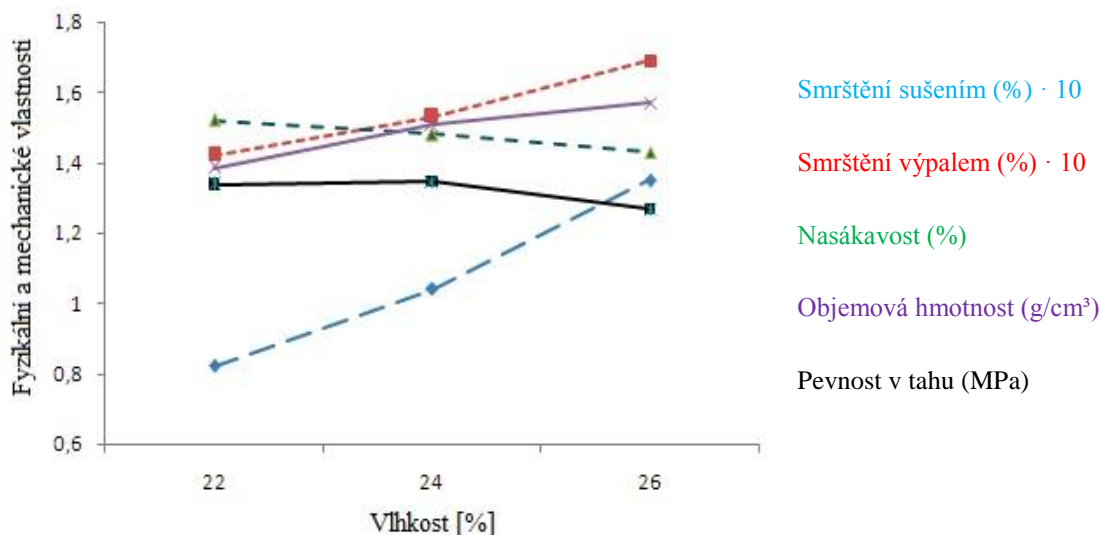
Surovina/chemická sloučenina	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_2	K_2O	Na_2O	ZŽ
Šedý jíl	48,0	10,6	4,7	13,5	1,7	1,2	1,5	0,6	17,3
Žlutý jíl	51,3	12,3	4,8	11,4	1,5	0,9	1,7	0,6	14,7
Tufy	33,7	15,8	4,4	2,3	2,4		4,3	3,4	2,9

Jednotlivé složky byly naváženy v suchém stavu. Po navážení se piliny umístily na 48 hodin do vodního prostředí. Poté byly vytvořeny 3 směsi z každého druhu pilin. Množství jednotlivých surovin ve směsi je uvedeno v tabulce 9. Vzorky se suší v laboratorním prostředí (21 °C, 60 % relativní vlhkost) po dobu 72 hodin a poté se umísťují do sušárny (teplota sušení 105 °C). Analýza velikosti částic se prováděla za mokra. Výrobky se vypalovaly v tunelové peci. Cihličky byly po výpalu podrobeny mechanicko-fyzikálnímu zkoušení (pórovitost, objemová hmotnost, smrštění sušením a výpalem, pevnost v ohybu). [10]

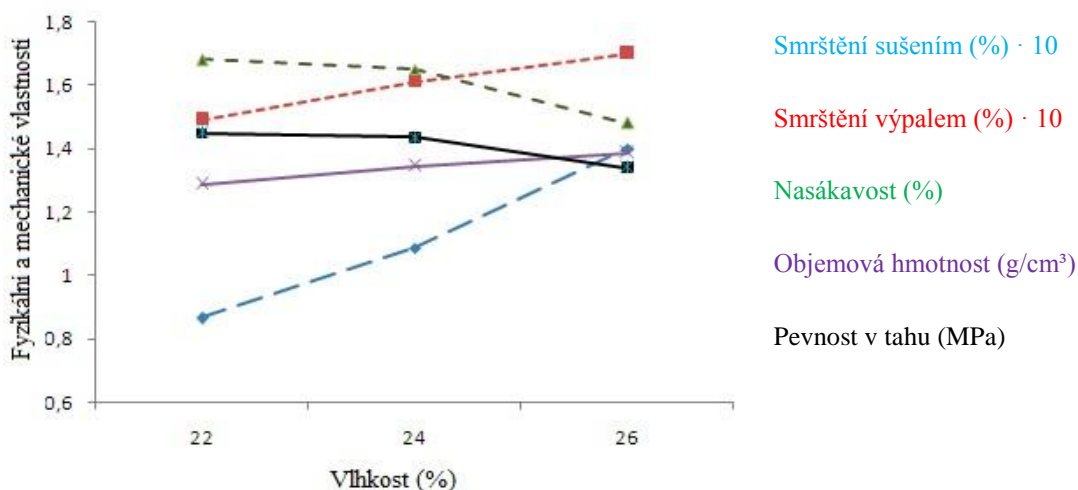
Tabulka 9 - Složení směsí v % [10]

Směs	Šedý jíl	Žlutý jíl	Piliny	Tufy
S1	24	65	3	2
S2	27	65	6	2
S3	30	65	9	2

Chemické složení v jednotlivých surovinách je zásadní pro konečné vlastnosti keramického střepu. Oba dva jíly mají množství Al_2O_3 nižší než 14 % – patří mezi takzvané kyselé jíly. K_2O a Na_2O jsou alkálie, které zvyšují pevnost střepu, ale snižují žárovzdornost. Žlutý jíl obsahuje více SiO_2 - je více písčítý (působí jako ostřívo). Smrštění sušením, smrštění výpalem, nasákavost, objemová hmotnost a pevnost v ohybu v závislosti na vlhkostech je patrná v následujících obrázcích 8 a 9. [10]



Obrázek 8 - Fyzikálně mechanické vlastnosti keramické cihličky s eukalyptovými pilinami v množství 9 % hmotnostních a teplotě výpalu 950 °C [10]



Obrázek 9 – Fyzikálně mechanické vlastnosti keramické cihličky s borovicovými pilinami v množství 9 % hmotnostních a teplotě výpalu 950 °C [10]

Smrštění borovice je vyšší jak eukalyptu, proto by bylo vhodnější používat piliny eukalyptové. Aby výrobek mohl být používán jako tepelně izolační, tak je

nejvhodnější možností použít směs o vlhkosti 24 % s eukalyptovými pilinami. Studie úspěšně prokázala, že je možné získat tepelně izolační keramickou cihlu s daným množstvím pilin. Bylo prokázáno, že je důležité vybrat správný druh pilin. Výsledky ukazují, že objemová hmotnost pohybující se od $1,48 \text{ g/cm}^3$ do $1,65 \text{ g/cm}^3$ jsou o 20-10 % nižší, než objemové hmotnosti cihel nevylehčených. Pevnost v ohybu klesá se stoupající vlhkostí směsi. [10]

Eukalyptové piliny se mohou využívat jako druhotná surovina. Pro dosažení optimálních vlastností je ideální přidat 9 % pilin z navážky. [10]

3.8.3 Izolační žárovzdorné produkty bez šamotu (ostřiva)

Pro získání izolačních šamotových žárovzdorných materiálů o hustotě $1,0 \text{ g/cm}^3$ je běžné využívat vyhořívající přísady. Možností lehčení je mnoho, avšak piliny se prokázaly (z vyhořívajících přísad) jako nejlepší z hlediska smrštění, praskání a vybočování produktů. V Sukholze Firebrick Factory byla vyvinuta nová technologie pro výrobu izolační žárovzdorné cihly o hustotě menší než $1,0 \text{ g/cm}^3$ bez použití šamotového ostřiva. [11]

Žárovzdorný jíl a piliny se dávkovaly objemově v poměru 1:2. Pojivo se mixovalo ze tří druhů jílu (Bogdanovich, Kuranski a Nizhne – Uvel'sk) v poměru 3:3:1. Piliny se pak prosévaly přes síto o velikosti otvorů 6 mm. Technologie byla založená na tom, že jeden z jílu byl neplastický, v podstatě písek. Všechny složky se dávkovaly objemově. Vlhkost této směsi je 30-31 % a zdánlivá hustota $1,42 \text{ g/cm}^3$. Směs je promíchána a poté putuje do hnětacího stroje. Přívod směsi je kontinuální a rovnoměrný. Výlisky byly vytvořeny na finální lisovací jednotce. [11]

Produkt se suší na maximální obsah vlhkosti 2,5 % v tunelových sušárnách s relativní vlhkostí 85-95 %. Teplota vzduchu na vstupu je 150-160 °C a na výstupu 30-35 °C. Vysušené výrobky byly kvalitní a bez trhlinek. [11]

Výpal probíhá v tunelových pecích. Tyto pece byly nastaveny na teplotu výpalu 1260-1280 °C. Pecní vozy, na nichž jsou uloženy vysušené výrobky, jsou 30 minut v předehřívací zóně a 20 minut probíhá samotný výpal. Smrštění výpalem bylo poměrně velké, ale bez deformací. Objevily se také drobné trhlinky, ale celkově byl vzhled dobrý. Pevnost v tlaku a zdánlivá hustota jsou uvedeny v následující tabulce 10. [11]

Tabulka 10 - Mechanické vlastnosti výrobku [11]

	Pevnost v tlaku [kg/cm ²]	Zdánlivá hustota [g/cm ³]
Maximální hodnota	50	1,04
Minimální hodnota	31	0,9
Průměrná hodnota	43	1,01

Výzkumem bylo dokázáno, že je možné vyrábět tento druh výrobku bez šamotového ostřiva. Technologie používaná před výzkumem obsahovala navíc krom šamotu ještě lignin (21 % jílů, 11 % šamotu, 68 % ligninu a pilin). Průměrná pevnost v tlaku byla 32 kg/cm² a zdánlivá hustota 1,01 g/cm³. Nový produkt má pevnost v tlaku 36 kg/cm², zdánlivou hustotu 0,94 g/cm³ a žárovzdornost 1690 °C. Chemické složení produktu je 32,8 % Al₂O₃ a TiO₂, 3,7 % Fe₂O₃ a ztráta žiháním 0,16 %. Zkoušky prokázaly, že struktura a složení je téměř stejné jako výrobky vyráběné s ostřivem a ligninem. Vzorky bez šamotu mají nahnědlou barvu a obsah křemene je asi 8-10 %. Mineralogicky je rozdíl mezi těmito dvěma výrobky hlavně v množství mullitu. Cihly bez ostřiva ho obsahují více. [11]

Pokud by byla zavedena tato technologie bez ostřiva (a ligninu), výrazně se sníží náročnost přípravy těsta (snížení času míchání až na ¼) a tím se samozřejmě rapidně sníží náklady na výrobu. Další výhodou je, že piliny nejsou nutné nikterak speciální, tudíž jsou finančně nenáročné. Naopak ostřivo, které z výroby vylučujeme, má výrazně vyšší náklady. Dále je s touto technologií možno vytvářet složité tvary o hmotnosti jednoho kusu až 10 kg, se zdánlivou hustotou 0,9 g/cm³ (pro výrobu těchto produktů je nutné upravit dobu homogenizace a vyvinout větší úsilí na sušení a výpal). [11]

Závěrem této studie je, že technologie bez využívání šamotového ostřiva je bez problému zvládnutelná a navíc i snižuje náklady na výrobu. Zjednodušuje se příprava těsta a zvyšuje se životnost výrobních linek → snížení nákladů. [11]

3.9 Využití chemické přísady VUPPOR při výrobě lehčeného šamotu

Tato chemická přísada se využívá zejména pro cihlářské účely a až v nedávné době se s ní začalo experimentovat i při výrobě lehčeného šamotu. [12]

3.9.1 VUPPOR

Chemická přísada VUPPOR byla vyvinuta při spolupráci Výzkumného ústavu petrochemického, a.s. Prievidza a Katedry materiálového inženýrství Stavební fakulty STU v Bratislavě. Při použití VUPPOR v cihlářství se ovlivňují některé technologické pochody a vlastnosti: [12]

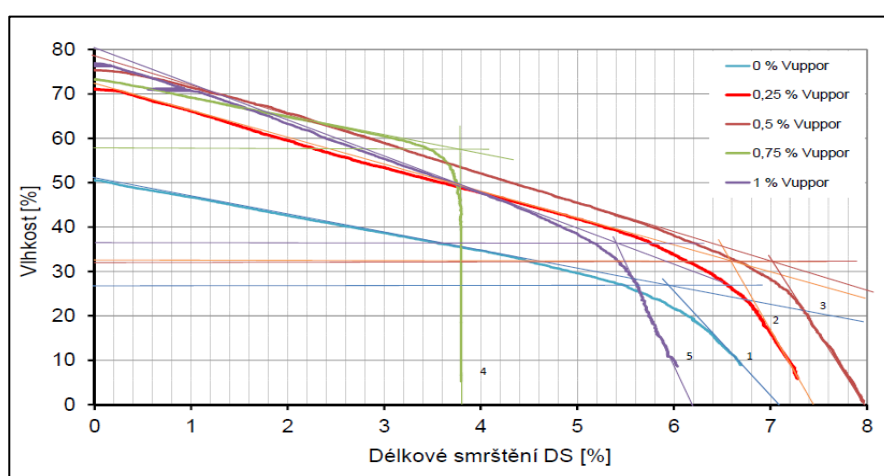
- Zkrácení sušení – snížení hodnoty citlivosti k sušení dle Bigota [12]
- Zkrácení vypalování a snížení teploty výpalu – zlepšení difúze vodních plynů v porézním systému střepu [12]
- Zvýšení množství vyhořívajících lehčiv bez vzniku černého jádra (častou příčinou vzniku těchto černých jader je nedokončení vyhoření organických látek ve střepu do počátku dehydroxidace jílových minerálů – vodní páry zabrání přístupu vzduchu do střepu a organické látky karbonizují na teplotně odolné formy uhlíku a ty již neshoří) [1, 12]
- Snížení hodnoty tepelné vodivosti [12]

První byl vyvinut VUPPOR I, jeho velkou nevýhodou však byla cena a během sušení se z něj uvolňoval čpavek. To jej omezovalo pro použití pouze v tunelových nebo kanálových sušárnách. Proto byl později vyvinut VUPPOR II, který měl mít stejné vlastnosti, ale jeho cena příznivější a ekologicky přijatelnější (použití pro všechny sušárny). [12]

3.9.2 Vuppor při výrobě lehčeného šamotu

Výzkum se zabýval možností využití této chemické přísady i při výrobě lehčeného žárovzdorného výrobku, konkrétně u výrobku Izospar společnosti SEEIF Ceramic, a.s. Tato tvarovka má dobré tepelně izolační vlastnosti, malou objemovou hmotnost a snadnou opracovatelnost broušením a řezáním. Snahou při výzkumu bylo, aby tvarovka měla objemovou hmotnost 650 kg/m^3 , pevnost v tlaku 1,2 MPa a klasifikační teplotu $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Dále mělo dojít ke snížení citlivosti k sušení a co nejmenší hodnoty součinitele tepelné vodivosti. [13]

a) Etapa 1 - V první etapě výzkumu byly vytvořeny směsi, přičemž jedna z receptur se inspirovala složením výrobku Izospar. Receptura byla složena z MM jílu, kaolínu, pilin a Vupporu. Do této směsi se přidávalo určité množství chemické přísady Vuppor (konkrétně 0 %, 0,25 %, 0,5 %, 0,75 % a 1 %) a sledovalo se, co to udělá s vlastnostmi výrobku. Předpokládalo se, že se zvyšujícím množstvím přísady, by se mělo zvětšovat množství vody použité do jednotlivých směsí, při stejném deformačním poměru dle Pfefferkorna. Ve vysušených vzorcích působila přísada na bázi pojiva, která zafixovala póry v mikrostruktuře a snížila se i citlivost k sušení dle Bigota. [13]



Obrázek 10 - Bigotovy křivky směsi jílu MM, kaolínu a pilin s různým množstvím Vupporu [13]

Výpal probíhal při teplotě 950 °C a 1200 °C. Při teplotě 1200 °C docházelo ke slinování a zhutňování vzorku, což vede ke snížení pórovitosti. Předpoklad, že se zvyšujícím množstvím příměsi do směsi bude vzrůstat množství potřebné vody, se potvrdil jako správný, což zaručuje větší pórovitost a menší objemovou hmotnost vypáleného výrobku. Dále došlo ke zlepšení tepelně izolačních vlastností a k eliminaci černého jádra. Nevýhoda, která nastala se zlepšením tepelně izolačních vlastností a nižší objemovou hmotností, je samozřejmě nižší pevnost. Další negativum je větší celkové smrštění se zvyšující dávkou příměsi. Avšak jako optimální dávka Vupporu bylo zvoleno množství 0,75 % i když jednoznačně to určit nelze. Je to v závislosti na tom, jaké vlastnosti chceme zlepšit, protože každá reaguje jinak na tuto chemickou přísadu. [13]

b) Etapa 2 - V další etapě tohoto výzkumu byla snaha modifikovat Izospar, aby měl objemovou hmotnost nižší než 650 kg/m³ a pevnost v tlaku více jak 1,2 MPa. Opět

bylo připraveno několik směsí, do kterých se přidalo zvolené množství Vuporru z minulého výzkumu. Jedna směs byla opět totožná s recepturou Izosparu. Přehled použitých směsí je v tabulce 11. [13]

Tabulka 11 - Složení jednotlivých zkoušených směsí [13]

Směs 1	Směs 2	Směs 3
Jíl MM	Jíl Fia	Jíl Fia
Kaolín DSA	Piliny	Piliny
Piliny	VUPPOR i	Lupek PGL 1-2
Lupek PGL 1-2		VUPPOR I
VUPPOR I		

Co se týče citlivosti k sušení, tak směs s ostřivem je středně citlivá k sušení, zatímco směs z jílu Fia a pilin je málo citlivá k sušení. Vuppor opět snižoval citlivost k sušení, což je velmi žádoucí u lehkých žárovzdorných materiálů. Z předchozí etapy se předpokládalo, že smrštění sušením se bude zvětšovat, avšak příjemným překvapením byl opak. Smrštění sušením se zmenšilo. Objemová hmotnost se nejvíc snížila při výpalu na 950 °C, přičemž Vuppor nejvíce ovlivnil vzorek bez ostřiva (lupku). Smrštění pálením ovlivňuje jen velmi málo u jílu Fia, naopak u MM jílu je smrštění pálením s chemickou přísadou větší než bez ní. Teplota 1200 °C byla opět moc vysoká pro požadovaný typ výrobku – docházelo ke slinování a hutnění. Pevnost v tlaku byla s použitím přísady Vuppor nižší. [13]

Vzorek bez ostřiva (Izospar) s Vupporem vykazuje skvělé hodnoty objemové hmotnosti, takže součinitel tepelné vodivosti je také velmi příznivý. Negativně se projevuje zejména na pevnosti v tlaku. Hodnoty se nedostávají na požadovaných 1,2 MPa. [13]

V závodu SEEIF ceramic a.s. byla provedena poloprovozní zkouška výrobku Izospar za použití chemické přísady Vuppor i za přítomnosti Ing. Chromého z Výzkumného ústavu petrochemického, a.s. Prievidza, firmy, která Vuppor vyrábí. Z této zkoušky je patrné, že Vuppor ve směsi působí částečně jako pojivo a směs je lepkavá (těsto se při prvním zkoušení ani nedalo táhnout, muselo se přidat více vody a ani pak nebylo těsto ideální). Vuppor si našel využití jen u velkých prvků. U těch dokáže eliminovat černá jádra a mírně zlepšuje povrch tvarovek. [13]

Součástí této etapy bylo i zkoušení různých druhů pilin. Konkrétně šlo o smrkové a dubové piliny. Klasicky využívaným druhem při výrobě lehčeného šamotu jsou piliny smrkové, ovšem jiné varianty se do dnešní doby nikterak nezkoumaly. Proto byly vytvořeny dvě směsi, přičemž každá obsahovala jeden druh pilin a byly srovnány vlastnosti. Frakce obou pilin byla do 2 mm a obsah pilin 27 %. [13]

Směs se tedy skládala pouze s těchto dvou surovin a vody. Voda potřebná pro vytvoření plastického těsta byla vyšší u vzorků se smrkem (70,1 %) než u vzorků s dubovými pilinami (60,54 %) při stejném deformačním poměru stanovém na Pfefferkornově přístroji. Větší množství vody je dáno tím, že smrkové piliny pojaly větší množství vody, než piliny dubové (mají větší nasákavost). Dubové piliny kladně ovlivňují i objemovou hmotnost výsušků → je mnohem nižší než u vzorků se smrkovými pilinami. Zřejmě vytvoří ve vzorku mikrostrukturu, která pomáhá k odpaření vody z cihličky a k tvorbě spojitě pórovitosti, která snižuje objemovou hmotnost. [13]

Nižší objemová hmotnost vzorků s dubovými pilinami zůstala i po vypálení vzorků. To je zřejmě způsobeno tím, že dubové piliny shoří pomaleji než smrkové a póry se nezmenšují. Zmenšování těchto pórů je způsobeno zvyšující se teplotou (při výpalu a vyhořívání pilin během výpalu), která podporuje slinutí střepu. Dubové piliny tomu zabraňují pomalejším vyhořením. [13]

Vzorky byly vypáleny při teplotě 950 °C nebo 1200 °C. Vzorky, které byly vypáleny na nižší vypalovací teplotu, měly lepší součinitel tepelné vodivosti a nižší pevnost (viz tabulka 12). [13]

Tabulka 12 - Tepelná vodivost a pevnost vzorků v závislosti na teplotě výpalu [13]

Vzorek	Teplota výpalu [°C]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]	Pevnost v tlaku [MPa]
Smrk	950	0,2362	1,7
	1200	0,3745	6,3
Dub	950	0,2068	1,5
	1200	0,3538	3,6

Po porušení vzorků byla v obou variantách patrná černá jádra. Cihličky s dubovými pilinami měly tmavě modrou barvu. Ta byla zřejmě způsobená obsahem třísloviny v kůře dubu. [13]

c) Etapa 3 - Tento výzkum se v navazujících etapách zabýval použitím dalších chemických přísad (škrob, Dextrin a Lovosa) s jílem Fia. Cílem bylo hlavně zlepšit technologické vlastnosti plastického těsta, které (jak bylo zjištěno v předchozí etapě) Vuppor zhoršoval. Pozitivní byly výsledky zaznamenány u vzorku, které obsahovaly 2 % Lovosy – pevnost v tlaku byla 2,3 MPa při objemové hmotnosti 702 kg/m³ při teplotě výpalu 1100 °C. Avšak do běžného provozu je to výsledek, který je zřejmě nepodstatný a to z důvodu vytvoření krusty na vzorcích během sušení, která je velmi citlivá. [13]

d) Etapa 4 - Poslední etapa výzkumu zkoušela vylepšit technologické vlastnosti s pomocí škrobu. Směs se opět skládala z jílu Fia, pilin a Vupporu (v dávce 0,75 %). Škrob se k této směsi přidával v množství 1 %, což by mělo být účinné i ekonomické množství. Zajímavým výsledkem byla zkouška klasifikační teploty. Byla splněna ideální hodnota a to 1300 °C (některé vzorky vypálené na teplotu 1200 °C měly klasifikační teplotu až 1400 °C). Jinak ale tato etapa nesplnila očekávání. Kombinací dvou přísad nedošlo k žádnému výraznějšímu zlepšení vlastností oproti tomu, když byly použity tyto přísady do směsi zvlášť. [13]

Závěr tohoto výzkumu, který se věnoval zkoumání chemické přísady Vuppor pro použití při výrobě lehčených šamotových výrobků, je takový, že přísada není z ekonomického hlediska vhodná. Nijak výrazně nezlepšuje vlastnosti výrobků, navíc výrazně zhoršuje tažení plastického těsta ve výrobě. Své uplatnění však Vuppor našel u výroby velkých tvarovek. V provozu společnosti SEEIF Ceramic, a.s. se přidává do směsi kvůli eliminaci černých jader a vzniku trhlin. [13]

4 Praktická část

V praktické části práce byly připraveny stejné směsi s rozdílným druhem pilin. Bylo vytvořeno plastické těsto, které se vhodným způsobem vysušilo a vypálilo na dvě rozdílné teploty. Na vytvořených vzorcích jsme zkoumali žárovzdornost, klasifikační teplotu, součinitel tepelné vodivosti a zejména ovlivnění složení pilin (respektive popela) ve vypálených vzorcích.

4.1 Příprava surovin a vytvoření plastického těsta

Piliny byly získány ze závodů, kde probíhá zpracování daného druhu dřeva. Velikost pilin byla značně rozdílná, proto byly prosety přes síto o velikosti otvorů 1 mm. Frakce pilin je tedy 0-1 mm. Piliny jsme poté vysušili v sušárně, při teplotě vzduchu 50 °C. Po vysušení byla stanovena sypaná hmotnost každého druhu pilin.

V této chvíli jsme získali všechny potřebné hodnoty pro namíchání plastického těsta. Těsto se skládá z 50 % pilin a 50 % jílu (objemové dávkování). Stanovená sypaná hmotnost byla využita pro získání hmotnostních dávek každé suroviny. Množství vody, které jsme přidali k jílu a pilinám, bylo zvoleno dle Pfefferkornova přístroje. Obě směsi obsahují tolik vody, aby jejich deformační poměr na Pfefferkornově přístroji byl optimální, tzn. zhruba 0,6.

Cihličky byly vytvářeny ručně. Po připravení plastického těsta byly cihličky natloukány do formy o rozměru 100x50x20 mm.



Obrázek 11 - Cihličky a žároměrky po odformování

Tabulka 13 - Složení surovinové směsi

Vzorek	Piliny (objemově) [%]	Jíl B1 (objemově) [%]	Sypná hmotnost pilin [g/l]	Piliny (hmotnostně) [%]	Jíl B1 (hmotnostně) [%]	Voda [%]
Smrk	50	50	138	12,7	87,3	33
Buk	50	50	262	22,5	77,5	36

Vzorky se nejdříve sušily na podložkách v laboratorních podmínkách a následně v sušárně na teplotu 110 °C do ustálené hmotnosti. V další fázi se vzorky vypálily na teplotu 900 °C a 1500 °C.



Obrázek 12 - Cihličky vysušené (šedá barva), vypálené na teplotu 900 °C (bílá barva) a vypálené na teplotu 1500 °C (oranžová barva)

4.2 Smrštění a objemová hmotnost

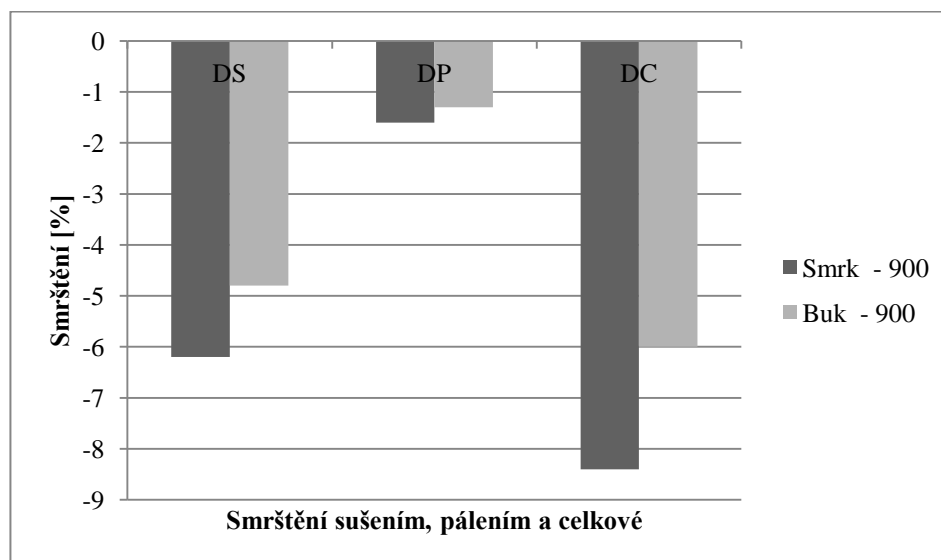
Na vytvořených cihličkách bylo zjišťováno smrštění sušením, pálením a celkové.

Tabulka 14 - Smrštění vzorků vypálených na teplotu 900 °C

Vzorek	DS [%]	DP [%]	DC [%]
Smrk - 900	-6,2	-1,6	-8,4
Buk - 900	-4,8	-1,3	-6,0

Jak je patrné z tabulky 14, buk vykazuje smrštění sušením nižší. Voda, která byla přidána do obou směsí, byla téměř stejná, a proto můžeme usuzovat, že piliny bukové mají lepší vlastnosti pro odvod vlhkosti ze vzorku, než smrkové. Může to být způsobeno tvarem pilin.

Smrk patří mezi měkká dřeva, kdežto buk mezi tvrdá. Tvrdá dřeva mají vyšší výhřevnost a tedy delší dobu hoření než měkká dřeva. To se projevilo při zkoumání smrštění pálením. Póry ve vzorku vznikají díky vyhoření pilin. Smrkové dřevo vykazuje vyšší smrštění pálením, což je patrně způsobené právě rychlejším vyhořením pilin, slinováním a tedy zmenšováním pórů. Dřevo bukové hoří déle a tím je zmenšování póru (slinování) zpomalen.

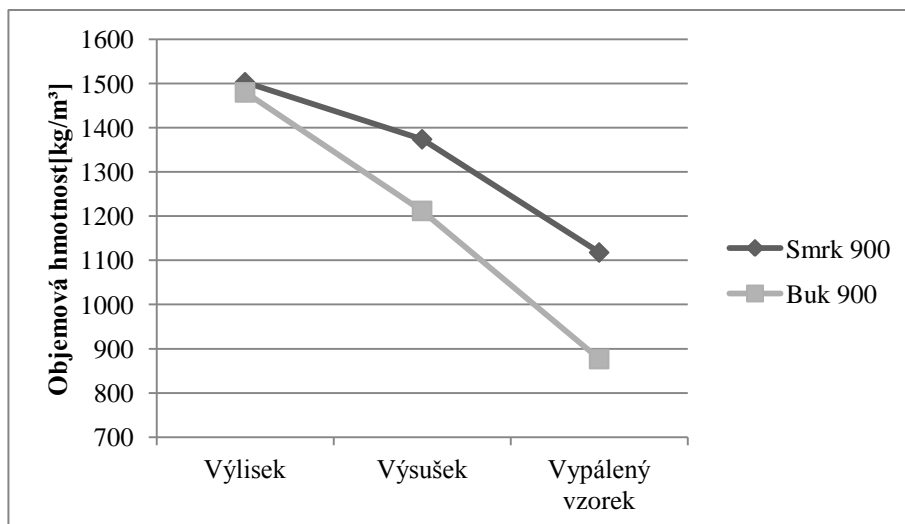


Obrázek 13 - Porovnání smrštění sušením (DS), pálením (DP) a celkové (DC) v závislosti na druhu použitých pilin při teplotě výpalu 900 °C

Objemová hmotnost je opět nižší u buku. Výlisek a výsušek je u vzorku se smrkem vyšší, kvůli nižší sypné hmotnosti pilin. U vypálených vzorků je patrný výraznější rozdíl, který je opět způsoben vyšší výhřevností pilin bukových a tedy jejich delšímu času hoření. Dále tuto skutečnost může ovlivňovat chemické složení popela.

Tabulka 15 - Objemová hmotnost vzorků vypálených na teplotu 900 °C

Vzorek	OH _{výlisku} [kg/m ³]	OH _{výsušku} [kg/m ³]	OH _{výpalku} [kg/m ³]
Smrk 900	1503	1374	1118
Buk 900	1480	1212	877



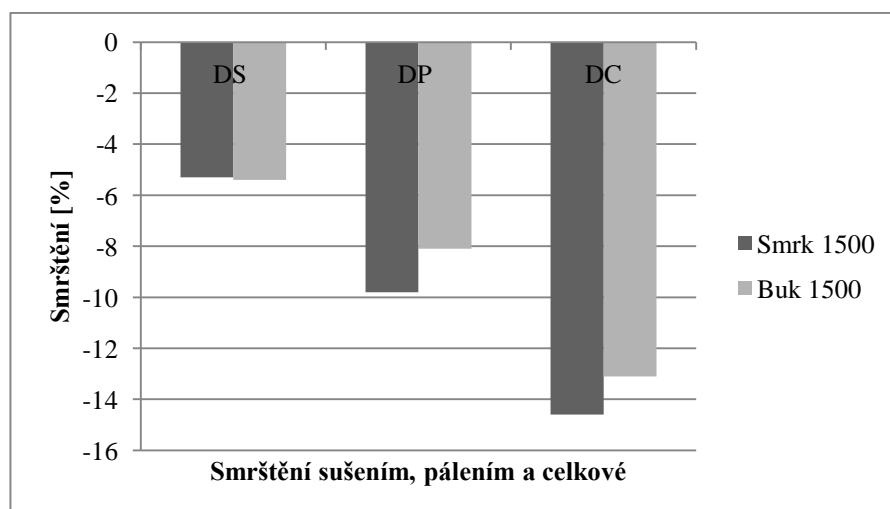
Obrázek 14 - Objemová hmotnost cihlíček s přidáním různých druhů pilin vypálená na teplotu 900 °C

Shodně byla provedena měření pro vzorky vypálené na teplotu 1500 °C.

Tabulka 16 - Smrštění vzorků vypálených na teplotu 1500 °C

Vzorek	DS [%]	DP [%]	DC [%]
Smrk 1500	-5,3	-9,8	-14,6
Buk 1500	-5,4	-8,1	-13,1

Z tabulky 16 je vidět, že smrštění pálením je u vzorků vypálených na teplotu 1500 °C vyšší u vzorku se smrkovými pilinami. Je to zřejmě způsobeno chemickým složením popela, který vznikne vyhořením pilin.

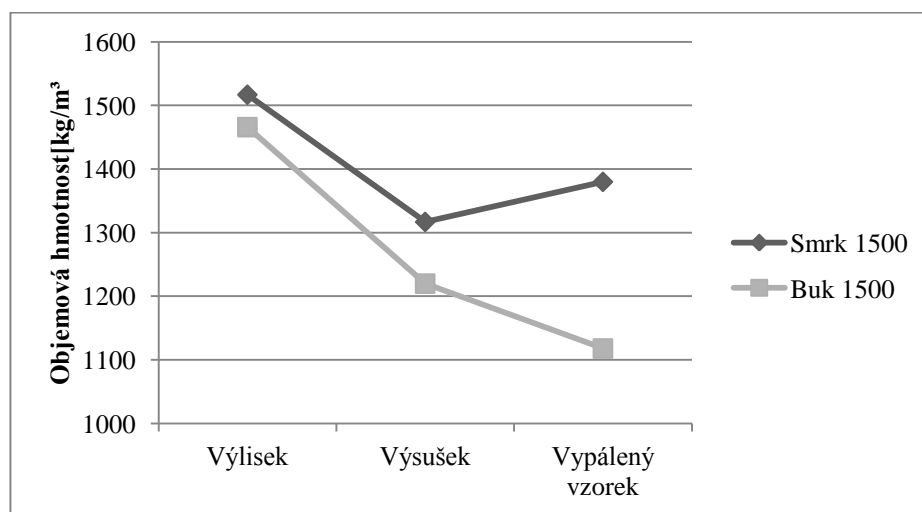


Obrázek 15 - Porovnání smrštění sušením (DS), pálením (DP) a celkové (DC) v závislosti na druhu použitých pilin při teplotě výpalu 1500 °C

Objemová hmotnost vypálených vzorků na teplotu 1500 °C je mnohem vyšší než u vzorků vypálených na teplotu 900 °C. To je způsobeno tím, že póry vzniklé po vyhoření pilin jsou eliminovány slinováním vzorku.

Tabulka 17 - Objemová hmotnost vzorků vypálených na teplotu 1500 °C

Vzorek	OH _{výlisku} [kg/m ³]	OH _{výsušku} [kg/m ³]	OH _{výpalku} [kg/m ³]
Smrk 1500	1517	1317	1380
Buk 1500	1466	1220	1118



Obrázek 16 - Objemová hmotnost cihliček s přidáním různých druhů pilin vypálených na teplotu 1500 °C

4.4 Chemické složení popela

Chemické složení popela z jednotlivých druhů dřevin je výrazně odlišné. Důkazem toho byly tabulky chemického složení smrku a buku uvedené v teoretické části. V rámci praktické části se vzorek podrobil rozboru ve zkušební laboratoři v Brně (konkrétně firmou LABTECH s.r.o.).

Tabulka 18 - Chemický rozbor popela smrku a buku v % (vztaženo k sušině)

	CaO	MgO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SiO ₂
Smrk	25,9	1,90	3,58	1,94	4,29	0,475	12,4
Buk	3,72	0,879	3,19	0,163	0,753	0,080	1,01

Z tabulky 18 je patrné, že smrkový popel má mnohem vyšší obsah CaO než popel bukový. Oxid vápenatý zkracuje interval slinutí, což může vysvětlovat nižší objemovou hmotnost buku (buk má CaO málo, kdežto smrk mnohem více). V cihličkách se smrkovými pilinami docházelo ke slinutí rychleji.

Oxid draselný a oxid sodný působí jako taviva (účastní se na tvorbě taveniny a snižují teplotu výpalu – střepe má stejnou pórovitost při nižší teplotě výpalu). V součtu obou těchto oxidů jich má smrkový popel více, což opět může ovlivňovat vyšší objemovou hmotnost smrku.

Oxid železitý se při redukční reakci mění na FeO, což je také tavivo. Opět má výrazně vyšší obsah tohoto oxidu smrk, z čehož můžeme usuzovat, že i tento oxid se podílí na zvýšení objemové hmotnosti vypáleného keramického střepu vylehčeného smrkovými pilinami. Dále snižuje žárovzdornost a zvyšuje pevnost.

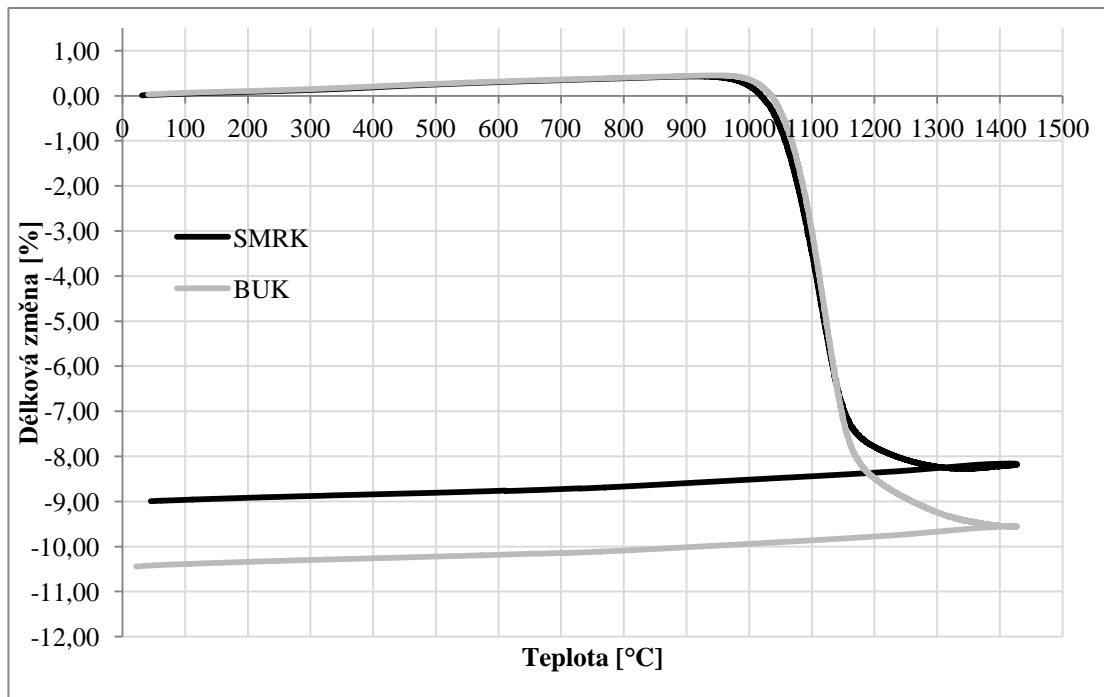
Oxid křemičitý snižuje citlivost k sušení a smrštění sušením. Obsah SiO₂ je vyšší u smrkového popela, ale na smrštění se tato skutečnost nijak neprojevuje.

Oxid hlinitý je známý zejména jako prvek zvyšující žárovzdornost. Oba druhy popela ho však obsahují jen velmi malé množství.

4.5 Diferenčně kontrakční termická analýza (DKTA)

Tato analýza probíhá ve vysokoteplotním dilatometru. Lze z ní určit délkovou změnu při vysokých teplotách a na základě toho určit teplotu použitelnosti daných výrobků. Vzorek musí být vyřezán do daného tvaru v závislosti na dilatometru. Takto připravený vzorek se umístí do nosiče dilatometru a zahřívá o zhruba 5 °C za minutu. Analýza trvá asi 6 hodin. Výsledek DKTA analýzy je graf. Jde o závislost změny délky (udávané v %) na teplotě.

Cihličky z buku i smrku byly upraveny tak, aby je bylo možné umístit do dilatometru. Následně byla provedena DKTA analýza, jejichž výsledkem je obrázek 17.



Obrázek 17 – Termicko-dilatometrická analýza cihliček se smrkovými pilinami (černá) a bukovými pilinami (šedá)

Na základě obrázku 17, na němž je vyobrazen graf DKTA analýzy je patrné, že teplota použitelnosti výrobků je u obou druhů cihliček stejná. Pokud by délkové změny měly být do 2 %, pak je teplota použitelnosti asi 1050 °C. Křivka klesá velmi strmě, proto překročení teploty použitelnosti je nepřijatelné. Od teploty 1150 °C (oba výrobky mají délkovou změnu už o 7 %) se křivky mírně liší.

Od teploty 1150 °C se délkové změny cihliček se smrkovými pilinami jen mírně zvyšují a při maximální teplotě (1430 °C) dosahují asi 8,2 %. Následně se vzorek začíná ochlazovat, kdy se délkové změny mírně snižují a poté se začnou opět navyšovat. Konečná změna délky (smrštění), při ochlazení na laboratorní teplotu je zhruba 9,0 %.

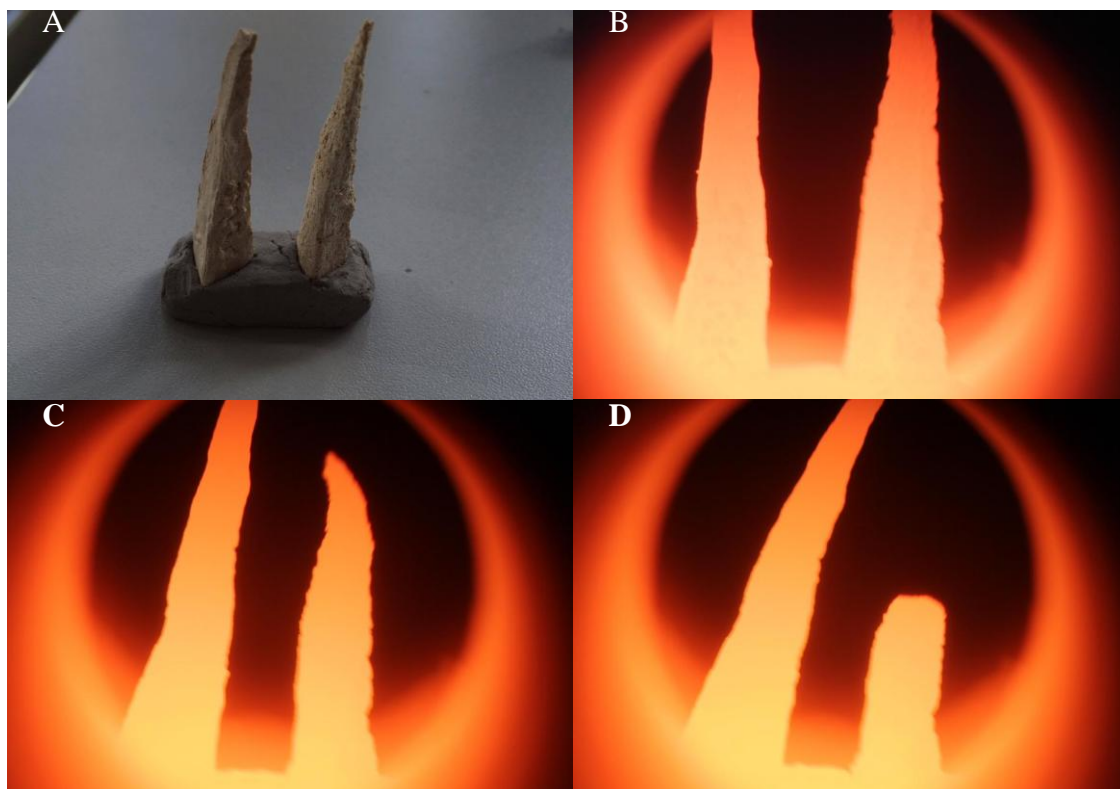
Vzorky s bukovými pilinami vykazují větší délkové změny od teploty 1150 °C do maximální teploty 1430 °C. Smrštění je zhruba 9,5 %. Vzorky se poté ochlazují na laboratorní teplotu a stejně jako vzorky se smrkovými pilinami se délkové změny nejdříve mírně snižují a následně opět zvyšují. Konečná délková změna (smrštění) je 10,4 %.

4.6 Žárovzdornost

Je to schopnost výrobku odolávat vysokým teplotám. Mnohdy je ale žárovzdornost relativně nedůležitým údajem a to z toho důvodu, že teplota použitelnosti daných výrobků je mnohem nižší než žárovzdornost. U šamotu je tohle velmi častá záležitost a nejinak tomu není ani u lehčeného šamotu.

Byly vytvořeny žároměrky, které byly vysušeny stejným způsobem jako cihličky. Ve výzkumném centru AdMaS, který je součástí Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, bylo v peci CLASIC CLARE 4.0. provedeno zkoušení žárovzdornosti výrobku. Do pece vede kukátko, kterým je možné proces sledovat popřípadě nafotit.

Obě dvě žároměrky (jedna vytvořená z jílu B1 a smrkových pilin, druhá z jílu B1 a bukových pilin) začaly vykazovat pohyb až u teploty 1700 °C. Vzhledem k tomu, že žárovzdornost jílu B1 je 1730 °C, tak lze říci, že popel (respektive chemické složení popela) ovlivňuje jen velmi málo žárovzdornost daných vzorků.



Obrázek 18 – Žároměrky (vlevo se smrkovými pilinami, vpravo s dubovými pilinami).

A) Vysušené žároměrky připravené pro zkoušení, B) Žároměrky v peci při teplotě 1600 °C,

C) Žároměrky v peci při teplotě 1700 °C, D) Žároměrky v peci při teplotě 1725 °C

4.7 Součinitel tepelné vodivosti λ

Součinitel tepelné vodivosti je veličina závislá na množství pórů v materiálu. Čím je množství pórů vyšší, tím je nižší objemová hmotnost a tím je lepší součinitel tepelné vodivosti. U lehčených šamotových výrobků jde o důležitou veličinu a to z toho důvodu, že se tyto výrobky používají jako izolanty.

Cihličky vytvořené z jílu B1 a smrkových či bukových pilin, bylo nutné před zjišťováním samotného součinitele tepelné vodivosti obrousit. Je to z toho důvodu, aby sonda (pomocí které zjišťujeme λ) byla celou plochou na vzorku.

Tabulka 19 - Hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ

	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)]	
	Vzorky vypálené na teplotu 900 °C	Vzorky vypálené na teplotu 1500 °C
Smrk	0,2368	0,5653
Buk	0,1661	0,4122

Z tabulky 19 je vidět, že cihličky s bukovými pilinami mají lepší tepelně izolační vlastnosti. Je to dáno tím, že tyto cihličky mají menší objemovou hmotnost a tedy větší počet pórů.

5 Závěr

Praktická část práce se věnovala zkoumání vlivu druhu pilin na důležité vlastnosti lehčených žárovzdorných materiálů

Co se týče smršťení, tak bukové piliny vykazovaly mnohem lepší vlastnosti než smrkové. Je to dáno vyšší výhřevností a delším časem hoření bukových pilin. Celkové smršťení vzorků s bukovými pilinami bylo o 6,0 % a vzorky se smrkovými pilinami vykazovaly smršťení 8,4 %. Další rolí zde hrají tavící oxidy z popela (zejména smrkového), které urychlují slinutí. Teplota 900 °C se obecně jevila jako mnohem lepší vypalovací teplota, než 1500 °C. Vzorky se při této teplotě již značně slinuly a smršťení se zvyšovalo.

Objemová hmotnost je také nižší i vzorků s bukovými pilinami. Je to opět dáno delším časem hoření a tedy eliminací slinování a zmenšování pórů ve vzorku. Dále tuto skutečnost může do značné míry ovlivňovat chemické složení popela, který vznikne z daného druhu pilin. Smrkové piliny totiž obsahují vyšší podíl alkálií než piliny bukové a vyšší množství Fe_2O_3 , které také působí jako tavivo. Poslední významný rozdíl mezi chemickým složením popela z buku a smrku je množství oxidu vápenatého, který také působí jako tavící oxid a snižuje žárovzdornost. Nejnižší objemová hmotnost je dosažena při vypalovací teplotě 900 °C u vzorku s bukovými pilinami a to 877 kg/m³. Vzorky se smrkovými pilinami vypálené na teplotu 1500 °C se ani nedají posuzovat jako lehčený šamot, neboť objemová hmotnost vzorků přesáhla 1200 kg/m³.

Součinitel tepelné vodivosti je v závislosti na objemové hmotnosti a tudíž je jasné, že opět vykazují lepší vlastnosti vzorky s bukovými pilinami. Hodnota součinitele tepelné vodivosti u vzorku s bukovými pilinami při vypalovací teplotě 900 °C je 0,1661 W/m⁻¹·K⁻¹ (vzorky se smrkem 0,2368 W/m⁻¹·K⁻¹).

Žárovzdornost je u obou vzorků vysoká a velmi se přibližuje žárovzdornosti jílu B1. Což je sice vysoká hodnota, ale teplota použitelnosti, která byla stanovena z DKTA analýzy je pouze 1050 °C při délkových změnách 2,0 %. Další zvyšování teploty je nepřijatelné, protože délkové změny se velmi navyšují.

Závěrem tedy můžeme říct, že alkálie (respektive tavící oxidy) obsažené ve smrkových pilinách zhoršují vlastnosti na vypáleném keramickém střepu. Bukové piliny se tedy jeví jako velmi vhodné lehčivo do lehčeného šamotu. Ve všech zkoumaných vlastnostech vykazují lepší výsledky, popřípadě stejné jako vzorky se smrkovými pilinami (například žárovzdornost). Jedinou jeho nevýhodou by mohla být vyšší cena pilin, kdy smrkové piliny stojí asi 200-350 Kč/m³ a bukové 350-450 Kč/m³.

Seznam použitých zdrojů

Literární zdroje

- [1] HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDORFER. *Technologie keramiky*. 1. vyd. Hradec Králové: Vega, 2000. ISBN 80-900-8606-3.
- [2] PYTLÍK, Petr a Radomír SOKOLÁŘ. *Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-720-4234-3.
- [3] LANG, Karel. *Žárovzdorné materiály*. Vyd. 1. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2010. ISBN 978-80-02-02244-2.
- [4] HERAINOVÁ, Marcela. *Žárovzdorné materiály*. 1. vyd. Praha: Silikátový svaz, 2003. Učebnice pro střední odborné školy (Silikátový svaz). ISBN 80-903-1134-2.
- [5] BUDNIKOV, Petro Petrovyč a kol. *Technologie keramiky a žárovzdorného zboží*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960, 597 s
- [6] NEVŘIVOVÁ, Lenka. *Speciální keramika: Žárovzdorné materiály, Modul BJ14-M04*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 68 s.
- [7] SOKOLÁŘ, R. *Keramika, Modul BJ01-M01*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, 176 s.
- [8] SOKOLÁŘ, Radomír a Lenka SMETANOVÁ. *Keramika – laboratoře, Modul BJ02-M01*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, 120 s.

Články v elektronickém časopise

[9] SUTCU, Mucahit, Sedat AKKURT, Alican BAYRAM a Uluc ULUCA. Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition. *Ceramics International*. 2012, **38**(2), 1033-1041. DOI: 10.1016/j.ceramint.2011.08.027. ISSN 02728842. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884211007371> nebo <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884211007371>

[10] CHENAMI, Bachir a Halima CHENAMI. Effect of Adding Sawdust on Mechanical-Physical Properties of Ceramic Bricks to Obtain Lightweight Building Material. *World Academy of Science, Engineering & Technology*;2012, Issue 71, p1655. 2012, 1655 - 1659. Dostupné také z: <http://search.proquest.com/openview/5c6396570f76acad9a812d93a1187f7b/1?pq-origsite=gscholar>

[11] BELOGRUDOV, A. G. Chamotte-free insulating refractories. *Refractories*. 1970, **11**(11-12), 690-692. DOI: 10.1007/BF01290582. ISSN 1573-9139. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/BF01290582>

[14] PITMAN, Rona. *Wood Ash use in forestry a Review of the Environmental Impacts* [<http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/d>]. Forestry Advance Access, 2006, , 1-25

Články v časopise

[12] ŠVÉDA, Mikuláš. *Chemická přísada VUPPOR 2*. Keramický zpravodaj. 2011, roč. 27, č. 3, s. 11-15.

Akademické práce

[13] SVOBODOVÁ, Markéta. *Posouzení možnosti využití přísady VUPPOR v lehčeném šamotovém střepe*. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ. Vedoucí práce Doc. Ing. Radomír Sokolář Ph.D.

Webové zdroje

[15] *Podpora lokálního vytápění biomasou: Buk lesní (Fagus sylvatica)* [<http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/buk.pdf>]. VŠB - Technická univerzita Ostrava: Výzkumné energetické centrum, 2011 [cit. 2016-04-22].

[16] *Podpora lokálního vytápění biomasou: Smrk (Picea)* [<http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/buk.pdf>]. VŠB - Technická univerzita Ostrava: Výzkumné energetické centrum, 2011 [cit. 2016-04-22].

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 - Fázový diagram $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ [6].....	12
Obrázek 2 - Rozměry referenčních žároměrek [1]	23
Obrázek 3 - Měřicí přístroj na stanovení únosnosti v žáru (měřicí zařízení umístěno pod zkušebním tělesem) a příklad měření skutečné deformace [1].....	25
Obrázek 4 - Různé zvětšení surovin na rastrovacím elektronovém mikroskopu – a) Jíl K244, b) Šamot, c) Odpadní papír, d) Piliny [9]	28
Obrázek 5 - Snímky z SEM s jílem K244 a různým množstvím pilin - a) 0 % pilin, b) 10 % pilin, c) 20 % pilin, d) 30 % pilin [9]	29
Obrázek 6 - Snímky z SEM s šamotem a různým množstvím pilin - a) 0 % pilin, b) 10 % pilin, c) 20 % pilin, d) 30 % pilin [9]	30
Obrázek 7 - Snímky ukazující množství a velikost pórů s různým množstvím pilin (směs s šamotem).....	30
Obrázek 8 - Fyzikálně mechanické vlastnosti keramické cihličky s eukalyptovými pilinami v množství 9 % hmotnostních a teplotě výpalu 950 °C [10].....	33
Obrázek 9 – Fyzikálně mechanické vlastnosti keramické cihličky s borovicovými pilinami v množství 9 % hmotnostních a teplotě výpalu 950 °C [10].....	33
Obrázek 10 - Bigotovy křivky směsi jílu MM, kaolínu a pilin s různým množstvím Vupporu [13]	37
Obrázek 11 - Cihličky a žároměrky po odformování	41
Obrázek 12 - Cihličky vysušené (šedá barva), vypálené na teplotu 900 °C (bíla barva) a vypálené na teplotu 1500 °C (oranžová barva).....	42
Obrázek 13 - Porovnání smrštění sušením, pálením a celkové v závislosti na druhu použitých pilin při teplotě výpalu 900 °C.....	43
Obrázek 14 - Objemová hmotnost cihliček s přidáním různých druhů pilin vypálená na teplotu 900 °C	44
Obrázek 15 - Porovnání smrštění sušením, pálením a celkové v závislosti na druhu použitých pilin při teplotě výpalu 900 °C.....	44
Obrázek 16 - Objemová hmotnost cihliček s přidáním různých druhů pilin vypálených na teplotu 1500 °C	45
Obrázek 17 – Termicko-dilatometrická analýza cihliček se smrkovými pilinami (černá) a bukovými pilinami (šedá)	47
Obrázek 18 – Žároměrky (vlevo se smrkovými pilinami, vpravo s dubovými pilinami).	48

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 - Koncentrace chemických prvků v jednotlivých druzích dřeva v mg/kg [14].....	20
Tabulka 2 - Rozdíl chemického složení mezi tvrdým a měkkým dřevem [14].....	20
Tabulka 3 - Chemický rozbor popela vzniklého vyhořením smrkového dřeva [% hmotnosti] [16].....	22
Tabulka 4 - Chemický rozbor popela vzniklého vyhořením bukového dřeva [% hmotnosti] [15].....	22
Tabulka 5 - Označení žároměrek a referenční teploty [2]	23
Tabulka 6 - Výsledky zkoušek vzorků s jílem K244 [9]	31
Tabulka 7 - Výsledky zkoušek vzorků s šamotem [9].....	31
Tabulka 8 - Chemické složení surovin v % [10].....	32
Tabulka 9 - Složení směsí v % [10].....	32
Tabulka 10 - Mechanické vlastnosti výrobku [11]	35
Tabulka 11 - Složení jednotlivých zkoušených směsí [13]	38
Tabulka 12 - Tepelná vodivost a pevnost vzorků v závislosti na teplotě výpalu [13].	39
Tabulka 13 - Složení surovinové směsi	42
Tabulka 14 - Smrštění vzorků vypálených na teplotu 900 °C	42
Tabulka 15 - Objemová hmotnost vzorků vypálených na teplotu 900 °C.....	43
Tabulka 16 - Smrštění vzorků vypálených na teplotu 1500 °C	44
Tabulka 17 - Objemová hmotnost vzorků vypálených na teplotu 1500 °C.....	45
Tabulka 18 - Chemický rozbor popela smrku a buku v % (vztaženo k sušině).....	45
Tabulka 19 - Hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ	49