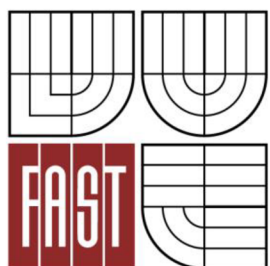




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

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

CIHLÁŘSKÁ OSTŘIVA A JEJICH TERMICKO-DILATOMETRICKÉ POSOUZENÍ

BRICKMAKING GROGS AND THEIR THERMO-DILATOMETRIC DETERMINATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÁCLAV HLADÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. RADOMÍR SOKOLÁŘ, Ph.D.

BRNO 2016



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	Václav Hladík
Název	Cihlářská ostřiva a jejich termicko-dilatometrické posouzení
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] García-Ten, J., Fernández, A. Recycling Marble Working Wastes in Manufacturing Ceramic Products. Part 2. DKG 2003, Vol. 80, yno. 10, p. E30-E34
- [2] Vavro, M., Porodová, T., Martinec, P., Sedlák, P. Jemnozrné odpadní podíly z úpravy drobového kameniva jako možné druhotné suroviny pro cihlářskou výrobu. Keramický zpravodaj 2008, Vol. 24, no. 4, p. 4-9
- [3] Monteiro, S. N., Pacanha, L. A., Vieira, C. M. F. Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations. Journal of European the ceramic Society 2004. No. 8, Vol. 24, p. 2349-2356.
- [4] Hanykýř, V. Kutzendorfner Technologie keramiky. Vega 2001
- [5] Lach, V. Mikrostruktura stavebních látek. druhé vydání: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně. červen 1991, ISBN 80-214-0309-8

Zásady pro vypracování

Cihlářská technologie standardně využívá jako ostřívo křemenné písky. V současné době je trendem využívat pro tyto účely tzv. výsivku, tedy frakci 0/4 drceného kameniva (moravská droba, žula, amfibolit apod.) s vysokým podílem jemných částic. Výsledkem popsání náhrady potom může být výrazné zvýšení pevnosti vypáleného střepu.

Cílem bakalářské práce je:

- na základě doposud publikovaných výsledků výzkumu shrnout zkušenosti s využíváním výsivek, prosívek a fillerů v cihlářské technologii,
- pomocí DKTA popsat chování různých druhů ostřív (křemenný písek vs. kamenné výsivky, prosívky) v cihlářském střepu,
- pro cihlářský střep navrhnout optimální druh ostříva na základě výsledných užitečných vlastností střepu (zejména pevnost, součinitel tepelné vodivosti) a ceny ostříva.

Předpokládaný rozsah práce asi 40 stran.

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

Bakalářská práce je zejména zaměřena na využití odpadní frakce kameniva jako alternativního ostřiva namísto tradičních křemenných písků. Sleduje vliv na vlastnosti vzniklého keramického výrobku. Sledovanými vlastnostmi jsou zejména nasákavost, pevnost v ohybu a pevnost v tlaku. Praktická část sleduje vlastnosti potencionálních alternativních ostřiv. Jejich chování je sledováno DKTA analýzou, zkouškami nasákavosti a pevnosti. Práce obsahuje můj návrh optimálního ostřiva, založený na publikacích a výsledcích praktické části.

Klíčová slova

Ostřivo, filler, odpad, kontrakčně dilatační termická analýza, citlivost k sušení, délkové změny, pevnost v ohybu, pevnost v tlaku, nasákavost.

Abstract

Main focus of the bachelor's thesis is use of rock waste fraction as an alternative raw material to traditional quartz sand. Effect of this substitution on ceramic products properties is outlined. Key properties are water absorption, flexural strength and compressive strength. The practical part traces the potential of alternative grogs. Their behavior is monitored by DKTA analysis, water absorption tests and strength tests. Thesis includes author's suggestion of an optimal grog based on publications and results of the practical part.

Keywords

Grog, filler, waste, contractionary difference thermal analysis, sensitivity of drying, length changes, flexural strength, compressive strength, water absorption.

Bibliografická citace VŠKP

Václav Hladík *Cihlářská ostřiva a jejich termicko-dilatometrické posouzení*. Brno, 2016. 51 s., 0 ks. příl. 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 zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25.5.2016

.....
podpis autora
Václav Hladík

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Radomíru Sokoláři, Ph.D. v první řadě za trpělivost, dále za odborné rady při vypracovávání, doporučení vhodných podkladů a ochotu. Dále chci poděkovat firmě Granit ZEDNÍČEK s.r.o. a Kámen PLUS za poskytnutí vzorků pro praktickou část. V neposlední řadě také děkuji panu Zbyňku Skotalovi za poskytnutí informací z prostředí praxe.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	11
2.1. SLOŽENÍ KERAMICKÉHO STŘEPU.....	11
2.1.1. <i>Plastické suroviny</i>	11
2.1.2. <i>Neplastické suroviny</i>	11
2.1.2.1 Ostřiva	12
2.1.2.2 Taviva.....	12
2.1.2.3 Lehčiva	13
2.2. MIKROSTRUKTURA KERAMICKÉHO STŘEPU	13
2.3. OBJEMOVÁ NESTÁLOST	13
2.3.1. <i>Objemová nestálost vlivem sušení</i>	14
2.3.2. <i>Objemová nestálost vlivem výpalu</i>	18
2.3.2.1 Modifikační přeměny křemene.....	19
2.4. VLIV PŘÍDAVKU KAMENNÝCH ODPRAŠKŮ NA VLASTNOSTI STŘEPU	22
2.4.1. <i>Vliv na nasákavost</i>	22
2.4.2. <i>Vliv na pevnosti</i>	24
2.4.2.1 Pevnost v ohybu	25
2.4.2.2 Pevnost v tlaku	27
2.5. EKOLOGICKÁ STRÁNKA VZNIKU ODPADŮ PŘI ZPRACOVÁNÍ KAMENE	28
2.5.1. <i>Vznik odpadů</i>	29
2.5.2. <i>Chemické složení odpadů</i>	30
2.6. NÁLEZ NETRADIČNÍHO OSTŘIVA V ARCHEOLOGICKÝCH NÁLEZECH.....	31
STAŘÍČ - OKROUHLÁ	31
2.7. VZORKY A PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY	32
2.7.1. <i>Žula</i>	33
2.7.2. <i>Moravská droba</i>	33
2.7.3. <i>Amfibolit</i>	33
2.7.4. <i>Kontrakčně dilatační termická analýza (DKTA)</i>	34
2.7.5. <i>Objemová hmotnost</i>	35
2.7.5.1 Výpočetní vztah objemové hmotnosti	35
2.7.6. <i>Nasákavost</i>	35

2.7.6.1	Výpočetní vztah nasákavosti	36
2.7.7.	<i>Pevnost v tahu za ohybu</i>	36
2.7.7.1	Výpočetní vztah pevnosti v tahu za ohybu.....	36
2.7.8.	<i>Pevnost v tlaku</i>	36
2.7.8.1	Výpočetní vztah pevnosti v tlaku.....	37
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
3.1.	NAMĚŘENÉ HODNOTY A VÝSLEDKY	38
3.2.	NÁVRH OPTIMÁLNÍHO OSTŘIVA PRO KERAMICKÝ STŘEP	43
3.2.1.	<i>Z hlediska součinitele tepelné vodivosti</i>	43
3.2.2.	<i>Z hlediska pevnosti</i>	43
3.2.3.	<i>Z hlediska ceny</i>	44
4.	ZÁVĚR	45
5.	POUŽITÉ ZDROJE.....	47
6.	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	50

1. ÚVOD

V poslední době je trendem využívat prosívku drceného kameniva a různě řezné či brusné odpady jako přísadu, náhradu či součást ostřiva v cihelném střepe. Tímto postupem se mění obecně známé vlastnosti, zejména pevnost a objemová stálost při sušení a výpalu. Samotná prosívka frakce 0/4 mm vznikající při drcení kameniv znamená zátěž pro životní prostředí, a tudíž se této druhotné surovině hledá uplatnění.

V řadě vědeckých článků a publikací se dočteme nejen o využívání kamenné výsivky v cihelném střepe, ale i o vlivu na výsledné vlastnosti produktu. A to zejména mechanických vlastností, snížení plasticity těsta a snížení rizika vzniku trhlinek při výpalu z důvodu objemových změn.

Návrh optimálního druhu ostřiva pak bude kombinovat informace získané z vědeckých odborných článků a výsledky praktické části, ve které bude provedena DKTA analýza hornin, u kterých je předpoklad, že by se daly jako alternativní ostřivo využít.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Složení keramického střepeu

Keramiku považujeme za silikáty. Takto označujeme všechny anorganické výrobky nekovové povahy, získány tepelným zpracováním přírodních nebo syntetických surovin a jejich kombinací, které obsahují sloučeniny křemíku, nebo jiné sloučeniny s podobnými vlastnostmi.[1]

2.1.1. *Plastické suroviny*

Mezi základní suroviny pro výrobu keramického střepeu patří plastické (jílovinové) zeminy. Tyto jílovinové zeminy jsou schopny po smíchání s vodou tvořit snadno tvarovatelné těsto. Dokážou na sebe navázat i zrna neplastických surovin. Plastičnost jim dodávají jílové minerály, u kterých je důležitým faktorem velikost částic pohybující se v desítkách mikrometrů. [2]

Jílové minerály se dělí na jíloviny, prachoviny a pískoviny. Podle obsahu jednotlivých jílových minerálů pak řadíme zeminy na jíl, kaolín, hlínu, písek. Jílové minerály zjednodušeně rozdělujeme do čtyř základních skupin. To jest skupina kaolinitu, montmorillonitu, illitu a chloritu. [1]

Použitelnost cihlářských surovin pro průmyslovou výrobu je velice ovlivněna granulometrií surovin. Nejvíce ovlivněné vlastnosti granulometrií jsou smrštění sušením, nasákavost, objemové změny při výpalu a pevnost v tahu ohybem. Tyto vlastnosti závisí ale také na pórovitosti, stupni slinutí a mnoha dalších faktorech. [2]

2.1.2. *Neplastické suroviny*

Za neplastické suroviny obvykle považujeme tyto tři základní skupiny surovin:

- ostřiva;
- taviva;
- lehčiva.

Neplastické suroviny nejsou schopny samy o sobě po smíchání s vodou tvořit plastické těsto. Z toho důvodu se používají jako příměsi do plastických keramických surovin. [2]

2.1.2.1 Ostřiva

Ostřiva jsou látky, které nemají plastické vlastnosti, snižují plastičnost těsta a tím snižují smrštění v důsledku sušení. Mohou být ale aktivní při výpalu, kdy může docházet k reakci s oxidy přítomnými v ostatních surovinách a k vytvoření pevné vazby, což vytvoří hutný slinutý střep. [2]

Nejčastějšími druhy základních ostřiv z hlediska chemického složení jsou:

- křemičitá ostřiva;
- hlinitokřemičitá ostřiva;
- speciální ostřiva.

Jako křemičité ostřivo se nejčastěji používá křemenný písek s obsahem SiO_2 vyšším než 90 %. Ostřiva na křemičité bázi vykazují při výpalu objemové změny, tím se tvoří nežádoucí napětí, které při chlazení může způsobit vznik malých trhlinek. Z tohoto důvodu se musí výrobky velice opatrně a pomalu chladit v úrovni krystalických přeměn křemene, což zpomaluje výrobu. Modifikační přeměny křemene jsou hlouběji rozebrány ve vlastní kapitole. [1] [2]

Hlinitokřemičitá ostřiva jsou dopředu vypálené jíly nebo lupky teplotou vyšší než 1000 °C. Jsou teplotně ustálená a při dalším výpalu již nedochází k dalším fyzikálně chemickým změnám.

Za speciální ostřiva lze zmínit například korund, který poskytuje zejména vysokou výslednou žáruvzdornost. K podobnému účelu lze použít například dolomitový či magnezitový slínek. [1] [2]

2.1.2.2 Taviva

Za základní tavivo považujeme látku, která snižuje teplotu výpalu, protože je snadno

tavitelná, nebo obsahuje oxidy, které vytvářejí v průběhu výpalu s dalšími oxidy snadno tavitelné sloučeniny. [2]

Nejčastěji používaná taviva jsou živce:

- živec draselný ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$);
- živec sodný ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$);
- živec vápenatý ($Ca_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$). [1] [2]

2.1.2.3 Lehčiva

Lehčiva slouží především ke snížení objemové hmotnosti výsledného cihelného střepu z důvodu tepelné vodivosti.

Cihelný střep se dá vylehčit:

- přímo - látkami, které při výpalu vyhoří, protože obsahují organické složky, často se používají dřevěné piliny, korková drť nebo popílek, polystyren a další;
- nepřímo - pomocí surovin, které mají samy o sobě nízkou objemovou hmotnost.

2.2. Mikrostruktura keramického střepu

Výchozí suroviny podléhají při zpracování různým změnám a vzájemným reakcím. Vznik mikrostruktury je ovlivněn zejména složením a poměrným zastoupením jednotlivých složek, zrnitostí, zpracováním surovin, vznikem nových minerálů, zánikem starých minerálů. Po dalších výzkumech bylo zjištěno, že na výsledných vlastnostech se podílí také přechodná mikrostruktura, tzv. mikrostruktura za syrova. Při stejné kvalitě, velikostech, tvaru a měrného povrchu zrn dosahujeme rozdílných fyzikálně mechanických vlastností při rozdílném zpracování, uskladňování, sušení. [3]

2.3. Objemová nestálost

Součástí výroby cihlářských výrobků je i sušení a výpal. V minulosti sušení probíhalo často v přírodních sušárnách, kde se využívalo větru. Z důvodu sušení nízkou teplotou venkovního vzduchu byl ale tento způsob zdlouhavý a náročný.

Nejčastějším typem přírodní sušárny byla tzv. Kellerova sušárna. Obrátkovost výsušků se pohybovala v rozmezí jednoho až dvou měsíců. Další využívaný způsob byla nadpeční sušárna, kde bylo využíváno teploty vzduchu nad pecí, ve které se výrobky vypalovaly. [4]

V moderní technologii výroby cihlářských výrobků se pro ještě větší zrychlení sušení výrobků vzduch často přihřívá a zajišťuje se jeho proudění. [4]

Při dlouhém sušení v přírodních nebo nadpečních sušárnách bylo riziko vzniku trhlinek v důsledku sušení menší než v dnešní době, kdy je zapotřebí vysušit výrobky co nejrychleji. [4]

2.3.1. Objemová nestálost vlivem sušení

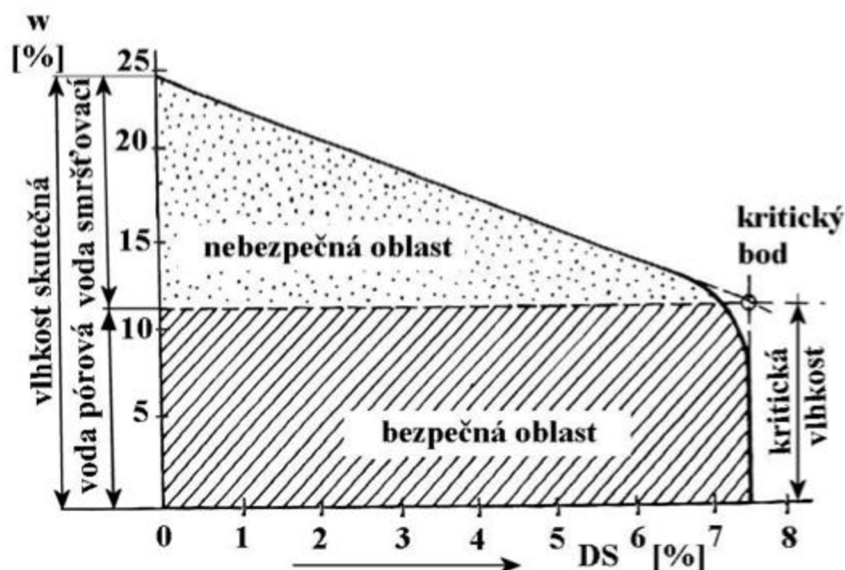
Smrštění sušením se pohybuje v procentech. Hodnotu pod 2 % lze již považovat za výbornou. Některé velmi plastické jíly mají smrštění sušením až 10 %. Za průměrnou hodnotu lze považovat přibližně 6 – 8 %. [5]

Hodnoty smrštění sušením hodnotíme a hlídáme nejen z důvodů rozměrové a tím i kvalitativní nestálosti keramických výrobků, ale také zejména z důvodu vzniku trhlin v důsledku tahových sil, které vznikají na povrchu a tlakových sil, které vznikají uvnitř výrobku. Toho, aby nám nevznikaly trhlinky, dosáhneme tak, že navrheme optimální složení těsta z hlediska granulometrie – nejčastěji pomocí Winklerova diagramu. Dále vzniku trhlinek můžeme zabránit zejména pomalejší rychlostí sušícího procesu a nižším procentem vody. [6]

Ve zprávě [22] se mimo jiné posuzovaly vlastnosti prosívky moravské droby z lomu Luleč z důvodu optimalizace surovinové směsi pro výrobu izolačních tvarovek. Po granulometrickém síťovém rozboru se došlo k velice plynulé křivce zrnitosti s rovnoměrným zastoupením všech frakcí, což by mělo zajistit dobrou ostřicí schopnost. Pokud granulometrie negativně ovlivňuje vlastnosti, dá se použít případně i směs ostřiv pro dosažení dostatečného množství potřebných částic. [22]

Citlivost k sušení se u nás nejčastěji posuzuje Bigotovou křivkou (Obr. 1), ze které

se určuje i kritická vlhkost a bezpečná či nebezpečná oblast sušení. [7]

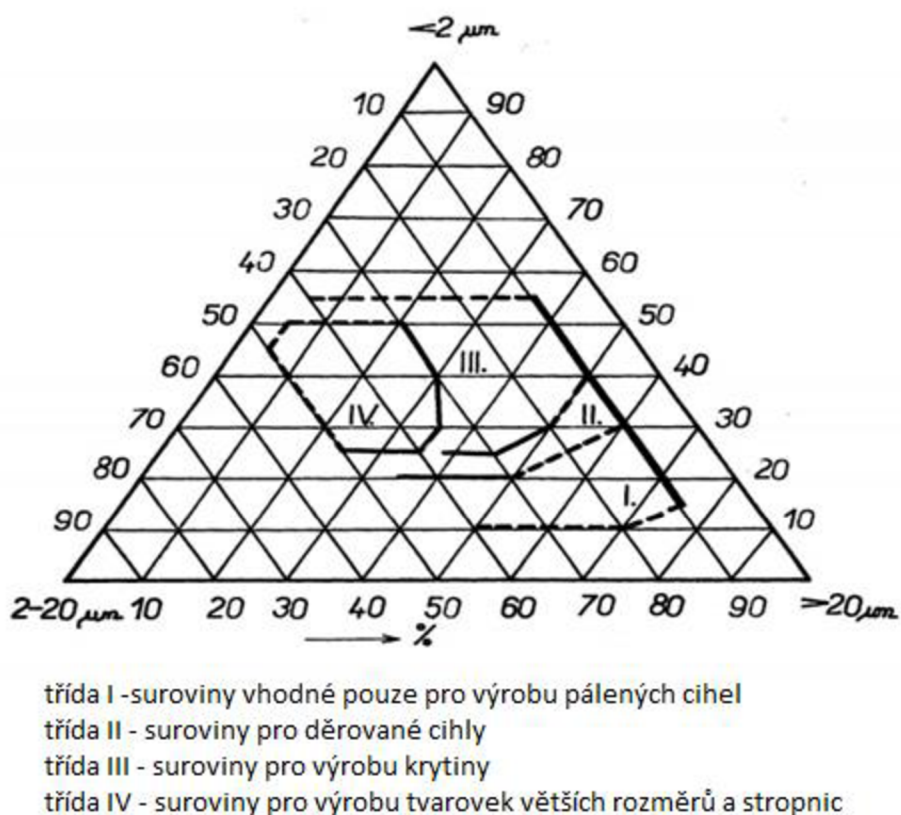


Obr. 1 - Bigotova křivka [7]

Elektronický článek [8] uvádí, jak použitím žuly dosáhli zlepšení vlastností v Campos, severně od Rio de Janeiro, v Brazílii. V asi 150 km vzdáleném žulovém lomu zpracovávají velké desky a bloky kamene a produkují až 400 tun odpadu za měsíc z řezání a broušení. Z toho důvodu, že převážná část zdejších jíílů je kaolínové povahy a z důvodu jejich vysoce plastických vlastností, zde měli problémy s rozměrovými vadami střešních tašek. Využívali zde odpadního kalu, který kromě zmíněného obsahu žulového prachu obsahoval také malé množství kovového prachu a vápna. V neposlední řadě také tento výzkum probíhal z důvodu snížení výrobních nákladů [8]

Pro použití ve výzkumu byl získaný kal vysušen při 110 °C, podrcen a nakonec proset na velikost částic 0,840 mm. Poté byly suroviny mineralogicky prozkoumány rentgenovou difrakční analýzou. Pro testování byly využity dva druhy místních jíílů. Zmíněný žulový odpad a místní křemenný písek. Obvykle jsou tyto dva jííly v receptuře kombinovány v poměru 70 % prvního jíílu, 20 % druhého místního jíílu a 10 % písku. V experimentu tato referenční receptura byla označena IC. Složení plastického těsta v této oblasti je velice problematické, protože místní jííly mají vysokou plasticitu a tím se také zvyšuje ztráta žíháním. Doposud se průmyslově

používaná receptura nenacházela ve správném místě na Winklerově diagramu, čili ne v oblasti III. Ostatní receptury s použitím žuly se měly svým složením přiblížit oblasti III Winklerova diagramu tak, aby zapadly do oblasti pálených tašek. [8]



Obr. 2 - Winklerův diagram [7]

Byly tedy zvoleny ještě tři receptury s různými poměry jílu a žulového odpadu, které byly označeny XC1, XC2 a XC3. [8]

Receptura	Jíl 1	Jíl 2	Písek	Žulový odpad
IC	20 %	70 %	10 %	-
XC1	80 %	-	-	20 %
XC2	45 %	25 %	-	30 %
XC3	15 %	45 %	-	40 %

Tab. 1 - složení zkušebních receptur [8]

Z daných receptur byly vylisovány vzorky, které byly následně 24 hodin sušeny

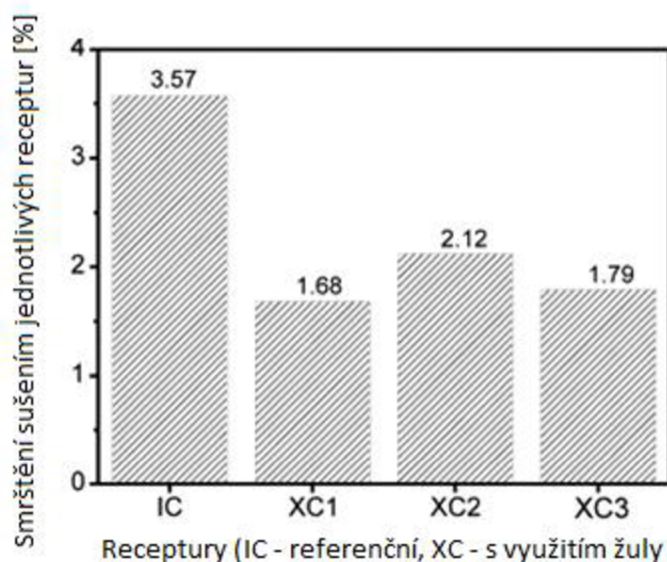
v laboratoři při teplotě místnosti a poté při 110 °C v sušárně do konstantní hmotnosti. Nakonec se vzorky vypálily na teplotu od 850 – 1100 °C. [8]

Zjišťovaly se parametry jako objemová hmotnost, smrštění při sušení a při výpalu, adsorpce a pevnost v ohybu (tříbodová metoda).

Z grafu (Obr. 3) jednoznačně vyplývá, že žula ve složení keramického střepe působí jako ostřívo lépe než křemenný písek obsažený v referenční receptuře a snižuje smrštění sušením přibližně na polovinu hodnoty oproti běžné receptuře IC. V úvahu se také ale musí brát fakt, že žulový odpad byl přidán do receptury ve dvojnásobném množství než křemenný písek. Snížení plasticity těles dovolilo snížit množství vytvářecí vody nutné pro vytlačení směsi. [8]

Tento stav přináší hned několik výhod:

- rychlejší proces sušení;
- snížení spotřeby energie;
- snížení rizika vzniku trhlin;
- snížení rizika rozměrových vad;
- zvýšení jakosti výrobků. [8]

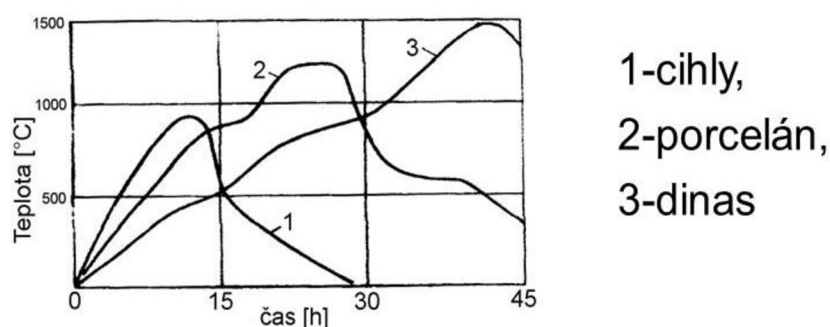


Obr. 3 - Smrštění sušením jednotlivých receptur [8]

Ve zprávě [22] z prostředí ČR se také potvrdilo, že kamenná prosívka má dobrý vliv na vlastnosti vytvářecí směsi a snižuje citlivost k sušení ještě o trochu lépe než křemenný písek. [22]

2.3.2. Objemová nestálost vlivem výpalu

Z důvodu energetické náročnosti výpalu je snaha o zkrácení doby výpalu na minimum s optimálním slinutím střepu a bez vzniku trhlin. Ke kontrole technologie výpalu v moderních provozech slouží pálicí křivka. Na pálicí křivce je viditelný čas výpalu, maximální teplota a časový průběh jednotlivých fází výpalu. [2] [4]



Obr. 4 - Pálicí křivka [2]

Cihlářská technologie se v moderní době snaží přiblížit vypalovací teplotě 800 °C, obvykle se teplota výpalu cihel většinou pohybuje od 800 do 1050 °C. Výpal nejčastěji probíhá v tunelových pecích a trvá do 30 hodin, jak je vidět na křivce (Obr. 4). V maximální teplotě většinou nastává izotermická výdrž z důvodu dobrého slinutí střepu. [2]

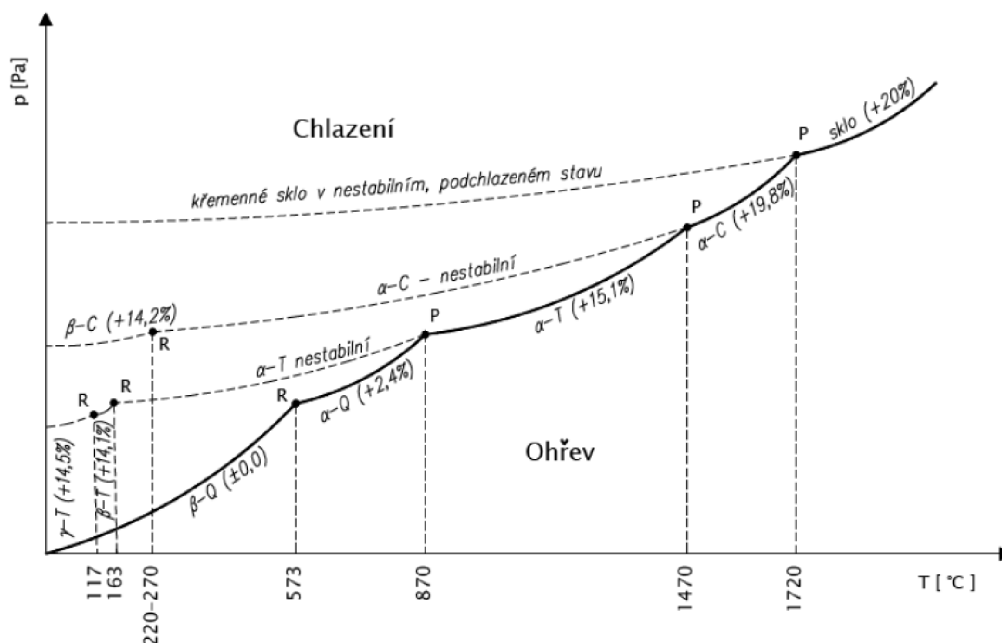
Ve stejném článku [8], ve kterém řešili nestálost sušením, se zabývali i výpalem. Při výpalu dochází k objemovým změnám. Praktické důsledky velkých objemových změn při výpalu střešních tašek měly za následek praskliny, deformace a ohýbání. K těmto změnám docházelo zejména kvůli obsahu SiO_2 . Bylo dokázáno, že tento problém řeší použití žuly namísto křemičitého písku, i když žula také obsahuje vysoké množství SiO_2 . [8]

2.3.2.1 Modifikační přeměny křemene

SiO_2 se vyskytuje v několika formách, ačkoliv chemický vzorec a složení zůstává stejné. Takovýmto formám říkáme modifikace. Při používání klasického křemičitého písku jako ostřiva riskujeme objemovou nestálost při výpalu, a tak ohrožujeme rozměry a jakost výrobků. Mohou vznikat i trhlinky. [5]

Pro cihlářskou technologii je nejzásadnější přeměna α – křemene na β – křemen, protože moderní technologie využívají β - křemene ve formě písku a vypalují většinou do teploty 1000 °C. Přeměna nastává při 573 °C a dochází u ní ke zvětšení objemu přibližně o 2,4 %, jak je znázorněno na Fázovém diagramu (Obr. 5). [5]

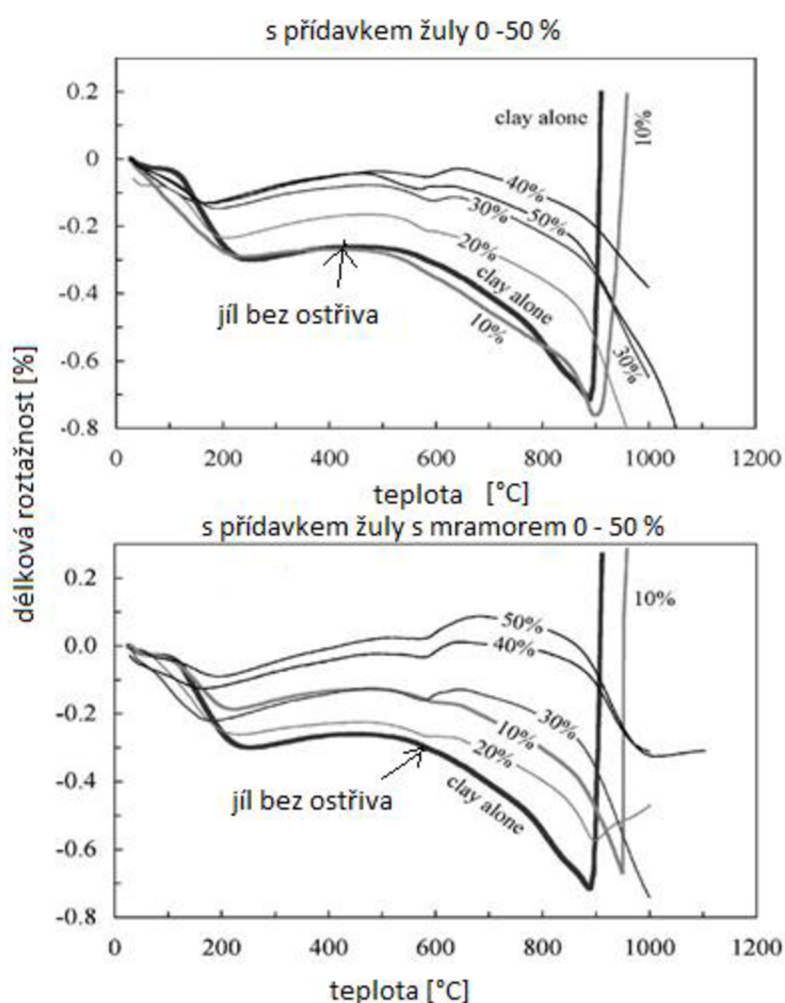
Ve zprávě [22] z prostředí ČR se prokázalo, že kamenná prosívka má výborný vliv na délkové změny po výpalu, a přispívá tak ke stálosti a jakosti výrobků. Vzorek s 10% obsahem prosívky Luleč dosahoval hodnoty smrštění pálením pouhých 0,3 %. Vzorek s 20% obsahem prosívky dosáhl dokonce hodnoty 0,1 %. Tyto hodnoty byly ze všech testovaných ostřiv (křemenný písek Žabčice, křemenný písek Držovice, směs ostřiv tvořená velkým podílem antuky a křemennými písky) nejpříznivější. [22]



Obr. 5 - Fázový diagram křemene [9]

Na fázovém diagramu jsou viditelné objemové změny křemene (pod křivkou v závorce) vlivem zvyšující se teploty. Legenda: Q značí křemen, C značí cristobalit, T značí tridymit, P značí pomalou změnu, R značí rychlou změnu. [5]

Enormní objemovou nestálost z důvodu modifikačních přeměn křemene uvádí i publikace [11]. Výzkumný tým, který se zabýval hledáním levnějších alternativ stávajících surovin, zkoumal využití žuly a mramoru jako náhrady stávajícího ostřiva a poblíž jejich výroby vznikalo hodně odpadu při opracovávání dekoračního kamene. [11]

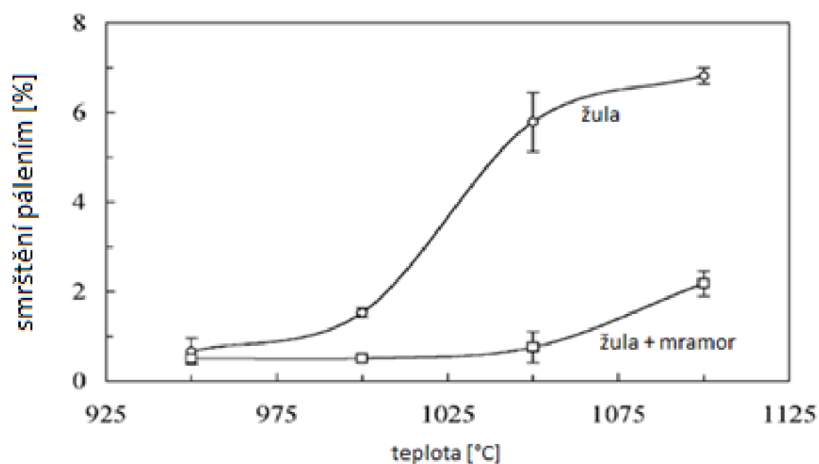


Obr. 6 - Délková roztažnost při přidavku různých podílů testovaných ostřiv (žula, žula + mramor) [11]

Z daných křivek (Obr. 6) délkových změn vzorků je patrné, že samotný jíl by nebylo možné použít. Vykazuje totiž velkou expanzi při 800 – 900 °C. Aby bylo možné tento

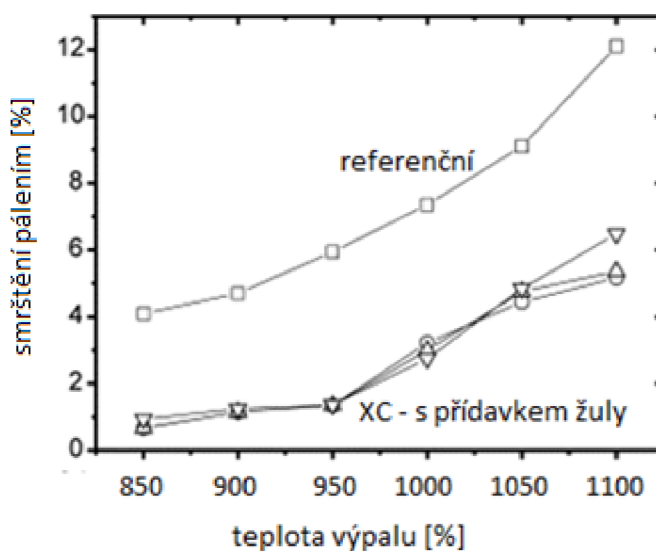
druh jílu využít, musí obsahovat minimálně 20 % přidaného neplastického podílu. [11]

Nejvhodnějším poměrem mísení se zdá být poměr 30 % neplastických surovin (odpadů) a 70 % jílu. Tomuto poměru vstupních surovin se dále věnovali a posuzovali zejména pevnosti, pórovitost a smrštění v závislosti na vypalovací teplotě. [11]



Obr. 7 - Smrštění pálením v závislosti na různých vypalovacích teplotách [11]

Smrštění pálením sledovali i v článku [8]. Z grafu (Obr. 8) je patrné, že referenční receptura dosahuje při všech vypalovacích teplotách vyššího smrštění, než receptury s přísávkou žuly.



Obr. 8 - Smrštění v závislosti na vypalovací teplotě [8]

2.4. Vliv přídavku kamenných odprašků na vlastnosti střepu

Užití kamenné výsivky může mít za následek nejen snížení plasticity těsta, ale může mít i zásadní vliv na pórovitost, nasákavost a na pevnosti výrobku.

V některých případech [8] [13] [16], kdy odpad obsahoval i živce, se setkáváme i s tavícím efektem, tedy se snížením nutné vypalovací teploty. Vypalovací teplotu můžeme snížit i v případě, kdy dosáhneme stejných fyzikálně mechanických vlastností při nižší vypalovací teplotě. [8] [13] [16]

2.4.1. Vliv na nasákavost

Nasákavost byla zkoušena u pokusů s využitím kamenné výsivky hned několikrát v publikacích [8] [12] [13] [14] [15].

V první publikaci [8] neměl přídavek žuly na nasákavost žádný zásadní vliv, i když by se dalo říci, že s rostoucím přídavkem žuly nasákavost velice mírně klesala. Stanovené kritérium bylo 18 % a splnily ho všechny testované vzorky, ať už s přídavkem nebo bez přídavku. Toto kritérium bylo ovšem splněno až u vypalovací teploty 1050 °C. U nižších teplot výpalu se pohybovala nasákavost okolo 20 %. [8]

V další publikaci [12] bylo uvedeno testování žulového odpadu z řezacích operací při úpravě dekoračních a okrasných bloků kamene. Výzkumná skupina přidávala do receptur od 10 do 50 % tohoto odpadu. Nasákavost se zde pohybovala přibližně od 2 do 7 %.

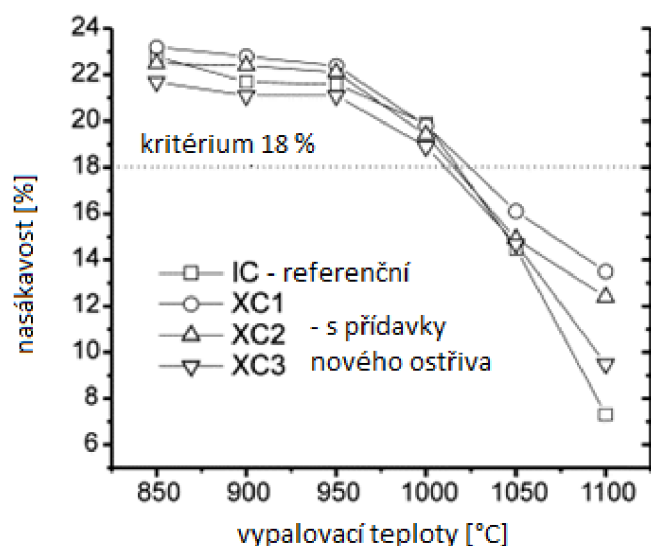
Publikace [12] má ale nepravidelné výchylky nasákavosti. Nejprve po přídavku z 20 na 25 % odpadu mírně klesne, poté vzroste při obsahu 30 % a nakonec zase klesne na minimální hodnotu při obsahu 38 %. Všechny studie se ale jednoznačně shodují v tom, že nasákavost klesá se zvyšující se vypalovací teplotou. Do obsahu 30 % testovaných náhrad tradičních ostriv při vypalovací teplotě okolo 1000 °C dosahují střepy dobrých hodnot a jsou použitelné pro průmyslové využití. [15] [13] [12]

I další provedená studie [13] se shodla s výsledky těch předchozích. A to tak, že

přidání žuly do koncentrace 30 % vede k výrobě kvalitních cihel. Převládající oxidy SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 , které jsou obsaženy v šamotu i v žulovém odpadu výrazně ovlivňují žáruvzdornost a pevnosti. Se vzrůstajícím podílem odpadu právě do hodnoty 30 % se zvyšuje hustota a snižuje nasákavost, což značí dobré slinutí střepu. [13]

V publikaci [15] se uvádí, že nasákavost s rostoucím přídávkem ruly velice výrazně klesá až do hodnot okolo 0,5 % (Obr.10).

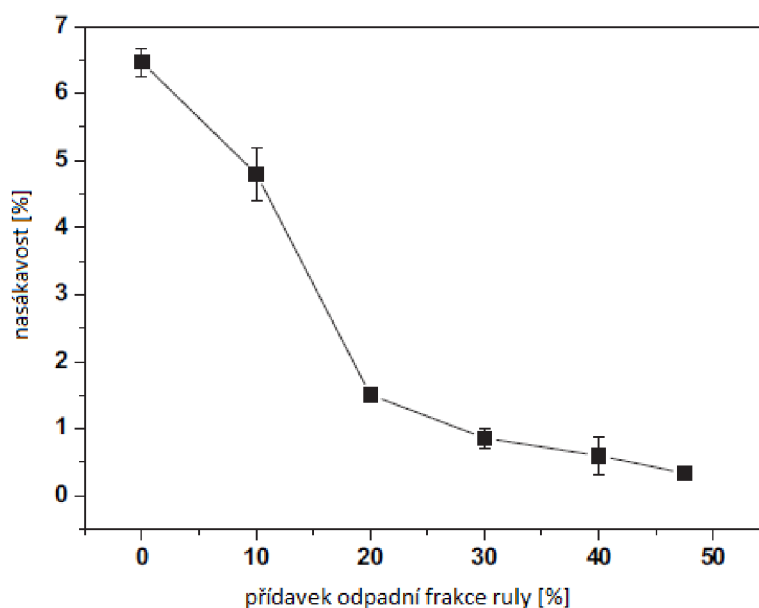
Velkým přínosem je zajištění využitelnosti jinak nepoužitelných jílu v publikaci [11]. Mimo to 30 % z hmotnosti surovin je již značné množství, z čehož vyplývá, že by se takto daly i slibně minimalizovat dopady na životní prostředí. [11] [14]



Obr. 9 - Nasákavost vzorků bez a s přídávkem žulového odpadu, klesá se zvyšující se vypalovací teplotou [8]

Ve zprávě [22] z prostředí ČR se v souvislosti s výsledky nasákavosti vzorků obsahujících kamennou prosívku Luleč se ukázalo, že kamenná prosívka nemá zásadně rozdílný vliv na nasákavost než klasický křemenný písek. Vzorky s využitím 20 % podílu křemenných písků vykazovaly po výpalu nasákavost 18,2 % a

18,3 %. Vzorky s využitím kamenné prosívky měly nasákavost 18,3 %. Prokázala se tedy použitelnost prosívek jako alternativních ostřiv pro cihlářské výrobky. [22]



Obr. 10 - Ukázka pozitivního vlivu přídavku odpadní frakce ruly z jednoho brazilského lomu [15]

2.4.2. Vliv na pevnosti

Ostřivo jako takové má pozitivní vliv na pevnosti. Tvoří pevnou kostru střepu. Že je využití výhodné z hlediska možnosti mírného snížení vypalovací teploty za zachování stejných mechanických vlastností výsledného produktu, nebo vylepšení mechanických vlastností uvádí článek [12].

V člancích [14] [11] [16] se po smísení surovin nejčastěji vytvářely vzorky z mírně vlhké směsi podle jedné osy lisované tlakem 20 - 30 MPa a slinované v elektrické peci po dobu 2 hodin při různých teplotách. Přičemž rychlost zvyšování teploty byla nejčastěji $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Používala se třibodová metoda zkoušky pevnosti v ohybu. [14] [11] [16]

2.4.2.1 Pevnost v ohybu

V elektronickém článku [8] došli k závěrům, že se pevnost výrazně zvyšuje se zvyšující se vypalovací teplotou, protože při provádění jejich zkoušky všechna tělesa zvýšila svoji pevnost se zvyšující se teplotou výpalu přibližně stejně. Nejvyšších pevností dosahovala směs s užitím 40 % žulového odpadu. Možným vysvětlením této vyšší pevnosti může být velikost částic, která je menší oproti písku referenční receptury. [8]

Jak je vidět na grafu nasákavosti (*Obr. 9*), referenční receptura má poměrně nízkou nasákavost, velice podobnou recepturám s použitím žuly, očekávali bychom tedy i stejně vysoké pevnosti, ovšem není tomu tak. Receptury s užitím žulového odpadu měly pevnosti vyšší. [8]

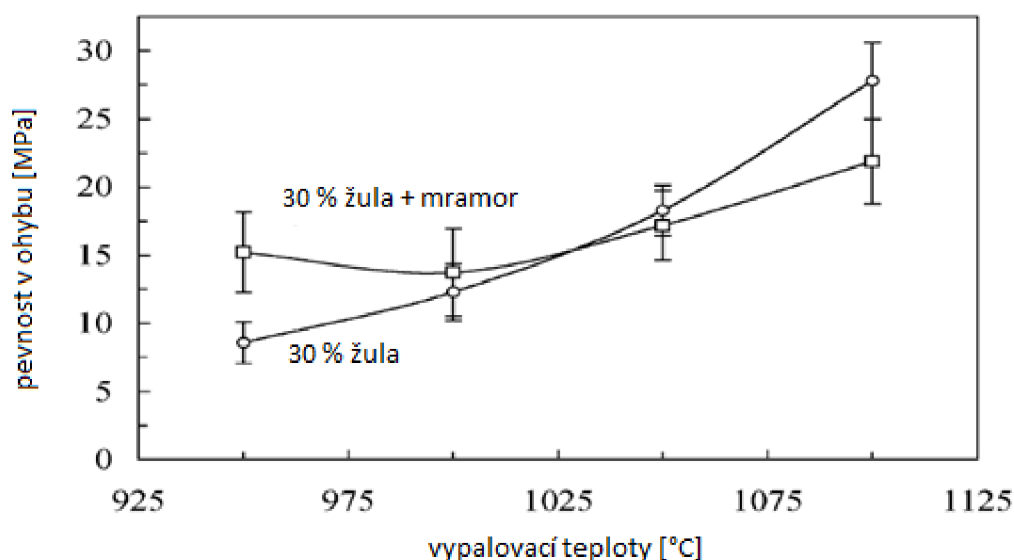
Z praktického hlediska by mohlo díky vysokým pevnostem dojít ke snížení vypalovací teploty. Při výrobě z receptury podobné složením XC3 (*Tab. 1*) by tak mohlo dojít ke snížení výrobních nákladů. [8]

Ve zprávě z ČR [22] vycházela pevnost v ohybu s využitím kamenné prosívky při jejím obsahu 20 % 10,8 MPa. Při porovnání se vzorkem využívajícím křemenný písek je tato hodnota pouze o 0,3 MPa nižší. Je ale vidět prokazatelné zvýšení pevnosti, se zvýšením obsahu prosívky z 10 % na 20 % došlo ke zvýšení pevnosti v ohybu skoro o 2 MPa. U dalších testovaných vzorků lehčených dřevěnými pilinami, měla nejvyšší pevnost v ohybu směs s obsahem 10 % prosívky Luleč, a to i přes porovnávání s recepturami s obsahem 20 % křemenného písku. Všechny lehčené střepe měly přibližně stejné objemové hmotnosti. [22]

Článek [12], zabývající se stejnou problematikou, také zaznamenal zlepšení mechanických vlastností, zejména pevnosti v ohybu, s užitím již od 20 % odpadu z broušení a řezání dekoračních kamenů. Setkali se tu ale s vysoce proměnnými vlastnostmi, zejména díky proměnlivému složení rezných odpadů. Shodli se, že pro využitelnost těchto odpadů by musel zpracovatelský průmysl také udělat ústupek a přizpůsobit technologii zpracování kamene tak, aby udržoval co nejkonstantnější vlastnosti. [12]

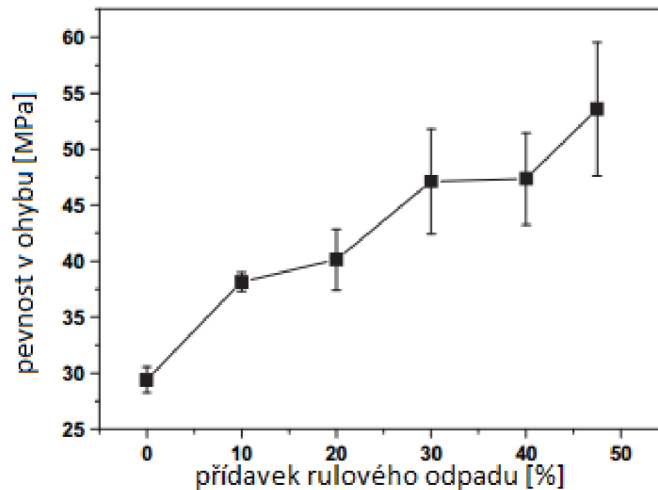
Další publikace [11] [15], ve kterých se zabývají problematikou vlivu přídavku alternativního ostřiva na pevnosti v ohybu, se dostávají většinou znovu a znovu ke stejným závěrům. Pevnost v ohybu se zvyšuje s rostoucí teplotou výpalu a je tomu tak zejména z důvodu slinutí jílových minerálů. [11] [15]

Se zvyšujícím se množstvím přidaného odpadu pevnost v ohybu roste, ale pouze do hodnot okolo 30 - 50 % [16]. V jednom případě [12] došlo k situaci, kdy vzorek s obsahem 50 % žulového prachu měl ze všech porovnávaných nejvyšší pevnosti. Pevnosti byly ale jen nepatrně větší než ostatní. Pevnosti v ohybu se většinou pohybovaly od 10 do 30 MPa, což jsou velice dobré výsledky. [11] [12] [15] [16]



Obr. 11 - Pevnost v ohybu s přídavkem 30 % alternativního ostřiva [11]

Další studie [15] využívala odpadní frakci ruly v lomu v Brazílii jako surovinu pro výrobu keramiky. Testované vzorky byly složeny z kaolínu, křemene, sodného živce a rulového odpadu v obsahu až do 47,5 %. Výpal proběhl v laboratorní elektrické peci na teplotu 1210 °C po dobu 60 minut. U takto připravených vzorků byl zaznamenán velký nárůst pevnosti v ohybu se zvyšujícím se obsahem rulového odpadu.



Obr. 12 - Pevnost v ohybu v závislosti na přidaném obsahu ruly [15]

2.4.2.2 Pevnost v tlaku

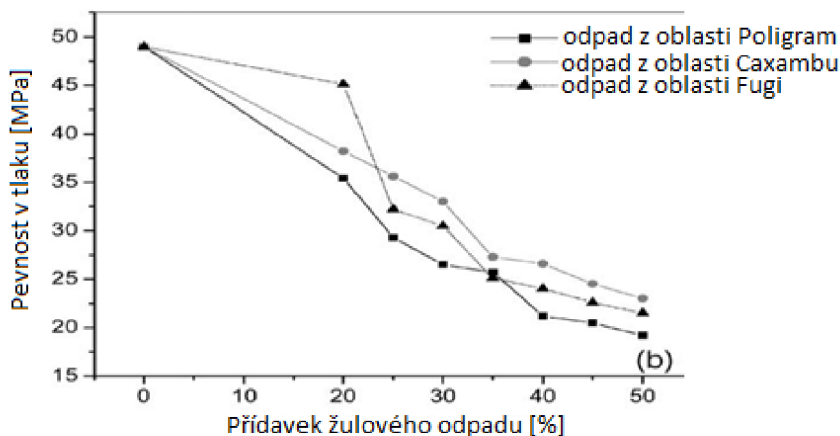
Ve výzkumech se dosahovalo výsledků obdobných jako u pevnosti v tahu. Pevnost v tlaku roste se zvyšující se teplotou výpalu. Pevnost v tlaku při zvyšujícím se obsahu odpadů většinou kolísala jen v malých odchylkách.

V článku [11] byly nejnižší naměřené hodnoty pevností v tlaku na velkých průmyslových vzorcích 190 x 90 x 90 mm, které byly lisovány a vypáleny v rozmezí 750 – 850 °C, aby byly nasimulované podmínky cihlářského odvětví, kde k určitému kolísání vypalovací teploty dochází a vypalovací teplota se pohybuje přibližně v tomto rozmezí. Tyto nejnižší pevnosti vycházely okolo 20 MPa v závislosti na původu kamenného odpadu, jak je vidět na Obr. 13. [11]

Pevnost v tlaku například vyšla v jednom vědeckém článku [16] 54 MPa při výpalu na 1050 °C. Byl zde využit muskovit-žulový odpad v obsahu 30 %. Takové pevnosti tvůrce článku utvrdily ve využitelnosti tohoto odpadu hlavně pro výrobu cihel. [16]

Ve stejné vědecké práci [16] došlo ale při použití jiného jílu i k enormnímu snížení mechanických vlastností, což bylo nejspíše způsobeno nekompletním spojením surovin, kde se kamenná výsivka chovala pouze jako inertní neplastický materiál.

Nevyužila svého velkého potenciálu. Pokud ale složení surovinové směsi vyladíme podle chemického složení jílu a ostřiva, můžeme docílit i zvýšení chemické odolnosti a žáruvzdornosti. [16]



Obr. 13 - Pevnost v tlaku klesající se zvyšujícím se obsahem žulového odpadu [14]

Ve zprávě [22] z prostředí ČR, vycházela pevnost v tlaku vzorků s použitím výsivky Luleč obdobně jako pevnost v ohybu o něco málo nižší, než pevnost u vzorků s využitím křemenného písku. Opět, stejně jako u pevnosti v ohybu, je ale vidět velký nárůst pevnosti z 31,6 MPa při 10 % obsahu prosívky na 37,8 MPa při 20 % obsahu prosívky. Pevnost vzorků s tradičně používaným křemenným pískem pak byla například u křemenného písku Žabčice 42,6 MPa. U vzorků lehčených dřevěnými pilinami měla stejně jako pevnost v ohybu nejvyšší pevnost v tlaku směs s obsahem 10 % prosívky Luleč, a to i přes porovnávání s recepturami s obsahem 20 % křemenného písku, při obdobných objemových hmotnostech. [22]

2.5. Ekologická stránka vzniku odpadů při zpracování kamene

Při neustále rozvíjející se společnosti a v zájmu udržení našeho životního stylu je zapotřebí se vyrovnat se vznikajícími odpady při drcení, řezání či leštění kamene. Při těchto operacích vznikají často odpadní frakce s vysokým podílem jemných částic. Těchto odpadů vzniká tolik, že ostatní průmysly nezvládají jejich zpracování. Využití těchto odpadů nemá pouze dobrý vliv na životní prostředí a s tím spojenou ekonomickou otázku likvidace, ale zároveň sníží náklady na výrobu svojí dostupností a cenou. [12]

V ČR je to z hlediska ceny kamenných výsivek velice příznivé. Například kamenolom Luleč ve svém ceníku uvádí cenu 73 Kč/tuna za frakci moravské droby 0/4 mm bez garance jakosti a granulometrie. Za písek 0/4 mm uvádí cenu 242 Kč/tuna. [23]

2.5.1. Vznik odpadů

Vznikající kal při řezání a broušení kamenných bloků (Obr. 14) poté odtéká do sedimentačních nádrží, nebo je pouze vyveden do volného prostranství lomu, kde se postupně hromadí a halduje (Obr. 15). V praxi ale bohužel často dochází k neekologickému splavování těchto odpadů do řek a lagun, což je zátěž pro životní prostředí. [12]



Obr. 14 - Broušení a řezání žulových bloků [12]

V České republice se spíše setkáme s odpadní frakcí 0/4 mm, popřípadě 0/2 mm, která vzniká při drcení kamene nejčastěji pro betonářské využití. Jedná se o frakci bez zajištění jakosti a velikosti zrn s velkým podílem jemných částic, tzv. filleru. Filler obsahuje částice menší než 0,063 mm. Nejčastější u nás používanou horninou do betonu je droba. Další často používanou horninou je žula. [21] [23]



Obr. 15 - Hromadění jemných odpadních podílů [12]

2.5.2. Chemické složení odpadů

Odpad z úpravy žuly v Brazílii ve studii [8] měl v chemickém složení viditelný obsah živců. Dále je zde vidět vysoký obsah oxidů železa, což by mohlo mít za následek zbarvení vypáleného keramického výrobku do červena. Co se týká velikosti částic, žulový odpad zde měl pouze jedno procento částic menších než 2 μm . Výskyt těchto jemných částic lze pravděpodobně spojovat s obsahem slíd. [8]

Surovina	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	LOI (%)
Žulový odpad	64,14	13,25	8,18	3,56	1,65	4,4	2,55	0,96	1,6

Tab. 2 - Tabulka chemického složení žulového odpadu [8]

Surovina	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	L.o.I. (%)
Žula	44,21	22,38	9,86	8,71	3,51	4,13	2,71	2,33	0,43
Žula a mramor	37,86	13,65	3,56	19,92	2,71	4,32	3,58	0,61	12,4

Tab. 3 – Tabulka chemického složení žuly a žuly s mramorem [11]

Surovina	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	L.o.I. (%)
Muskovit-žula	65,1	14	4,34	6,04	1,12	2,75	3,51	-	3,14

Tab. 4 – Tabulka chemického složení muskovit - žulového odpadu [16]

Na těchto třech tabulkách chemického složení (*Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4*) tří různých odpadů je vidět obsah živců, které způsobují i mírný tavící efekt při jejich použití v cihelném střepe. [8] [11] [16]

Žula obsahovala ve více případech stejné množství živců a dle předpokladu převažoval draselný živec nad sodným. [8] [11]

Dále je vidět poměrně velký rozdíl v obsahu SiO_2 . U žuly byl obsah oxidu křemičitého rozdílný téměř o dvacet procent. [11] [8]

Rozdíl v obsahu Al_2O_3 o téměř deset procent by také způsobil rozdílné chování výsledného střepe. Je proto důležité provádět výzkum a při záměru používat kamennou výsivku jako náhradu za ostřivo prozkoumat chemické složení vznikajícího odpadu. Důležité je také chemické složení jílu a to, zda budou tyto suroviny pro sebe vhodné. [8] [11] [16]

2.6. Nález netradičního ostřiva v archeologických nálezech Staříč - Okrouhlá

Pravěká keramika v sobě obsahuje mnoho přínosných informací týkající se technologie výroby a složení. [17]

Keramika ze Staříče - Okrouhlé již na první pohled obsahuje netypické ostřivo. Na povrchu jsou patrné vyčnívající úlomky tmavých krystalů velkých několik milimetrů (Obr. 16). V pravěké keramice ale stabilně nacházíme jako ostřivo křemen nebo na křemen bohaté horniny. Systematické používání krystalů pyroxenu nebo amfibolů nebylo dosud v pravěké keramice ve střední Evropě sledováno. Rozborům petrografického charakteru byly při tomto zkoumání podrobeny dva rozdílné keramické střepe. Jeden nevýrazně cihlově načervenalý střepe, druhý světle šedý, obsahující viditelné temně zelené až 4 mm velké krystaly. Zkoumání pod polarizačním mikroskopem ukázalo, že hlavní tělo keramiky je tvořeno směsí jílových minerálů s velikostí částic menších než 0,01 mm, částí prachových částic, křemenem a draselným živcem. Jako ostřivo byly tedy použity až 4 mm velké krystaly pyroxenu nebo amfibolů. Tyto krystaly v této lokalitě nepochybně pocházejí z těšinitů, nebo

z jim příbuzných hornin. Z nich se nejspíše získávaly vybíráním krystalů z rozdrčené natěžené horniny, což vypovídá o přímé snaze získání a použití amfibolů a pyroxenů jako ostřiva do keramiky. [17]

Na závěr lze konstatovat, že se jednalo zjevně o úmyslnou činnost a nejspíše bychom při hlubším zkoumání historické keramiky v této oblasti našli v oblasti výskytu těšinitů stopy pyroxenů a amfibolů. Nalezená keramika se dá také identifikovat podle vysokého množství těchto ostřiv a geologicky zařadit na našem území do oblasti severní Moravy. I když zde byly nalezeny i střepy, které obsahovaly jako ostřivo vulkanické tufy, záměrně drcené vápence a pikrity. Cílená práce drcení a vybírání krystalů ostřiva v pravěku nás přesvědčuje o znalosti keramické technologie v historii a mnohdy tedy budujeme nad problémy, které již byly kdysi vyřešeny. [17]



Obr. 16 – Zkoumané vzorky historické keramiky s viditelnými velkými krystaly [17]

2.7. Vzorky a prováděné zkoušky

Praktická část práce je zaměřena na zjišťování vlastností vzorků kameniv, které mají potenciál stát se druhotnou surovinou v keramické výrobě.

Použity byly vzorky amfibolitu, moravské droby, žuly a křemene (*Obr. 17*). Původně byly k dispozici vzorky dvou různých typů žuly, jejich výsledky ale byly natolik podobné, že jeden vzorek byl vyřazen pro přehlednost. Primárně byla provedena

kontrakčně dilatační termická analýza, následně po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto o stanovení dalších vlastností na vypálených a nevypálených vzorcích.

Vzorky byly upraveny do podoby trámečků tak, aby na nich šla provést DKTA analýza. Dále byla zjišťována objemová hmotnost, nasákavost a pevnosti. Porovnávací vzorek křemene byl ze Slovenska z okolí obce Hrubá Borša v Bratislavském kraji.

2.7.1. Žula

Žula obvykle obsahuje křemen, K-živec, slídy (biotit a muskovit). Využívá se ke všem účelům, k okrasnému i hrubému zpracovatelskému průmyslu. V ČR se nachází několik velkých masivů. Nejznámější lomařská oblast žuly je Mrákotín. Řadí se mezi magmatické horniny. Můj vzorek byl z lomu poblíž obce Kamenná v Kraji Vysočina. [21]

2.7.2. Moravská droba

Častěji používanou horninou v Česku je moravská droba. Řadí se mezi sedimentární horniny, které jsou tvořené především břidlicemi. Měl jsem vzorek z lomu u obce Luleč v Jihomoravském kraji. [21]

2.7.3. Amfibolit

Amfibolit je metamorfovaná hornina. V republice je zastoupena v menším množství než droba a žula. Značí se výrazným černým nebo šedočerným zbarvením a obsahem amfibolu a plagioklasu. Vzorek byl z okolí obce Želešice v Jihomoravském kraji. [21]

Před DKTA analýzou v pořadí: žula 1,
žula 2, moravská droba, amfibolit

Po DKTA analýze v pořadí: žula 1, žula 2,
moravská droba, křemen, amfibolit



Obr. 17 - vzorky použité na DKTA analýzu v praktické části

2.7.4. Kontrakčně dilatační termická analýza (DKTA)

Tato analýza slouží ke stanovení nevratné změny v průběhu ohřevu a ochlazování testovaného vzorku. Změny tedy vznikají jako následek chemických a fyzikálních procesů, jakými jsou například oxidace, krystalizace, sublimace, tavení, dehydratace, disociace. [18]

Sleduje se reakce vzorků keramických surovin a materiálů - bentonitů, dolomitů, vápenců, kaolinů a jiných látek, často jílovinových zemin. [18]

Ke kontrakčně dilatační termické analýze se využívá více typů přístrojů. Na typu používaného přístroje závisí charakter a tvar vzorků pro tuto analýzu. Obvykle však vzorky bývají tyčinkovitého tvaru. [18]

Dilatometr se skládá ze snímacího nástavce se vzorkem. Tato část je umístěna v pecním tělese. Uvnitř pece je kromě toho umístěn i regulační termočlánek a dále elektronický snímač, což je vlastní prvek měření v dilatometru. Tato metoda se

využívá převážně při optimalizaci pálicích křivek keramických výrobků. Sleduje se zejména lineární roztažnost testovaného vzorku. Pro tuto analýzu platí norma ČSN 72 1083. [18]

2.7.5. Objemová hmotnost

Pro stanovení objemové hmotnosti byla využita jednoduchá metoda s odměrným válcem.

Vzorky se zváží a do odměrného válce se dá předem definovaný objem kapaliny. Následně se vzorek ponoří do válce a sleduje se změna objemu. Objemová hmotnost se pak vypočte dosazením do vzorce.

2.7.5.1 Výpočetní vztah objemové hmotnosti

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

OH - objemová hmotnost kameniva [kg/m³]

m - hmotnost kameniva [kg]

V - objem z rozdílu na odměrném válci [m³]

2.7.6. Nasákavost

Ke zjištění nasákavosti byla využita rychlá metoda nasáknutí v exikátoru.

Zvážené vzorky se vloží do exikátoru tak, aby se nedotýkaly navzájem, ani stěn nádoby. Exikátor se zavře a pomocí vodní pumpy se odsaje vzduch. Po 10 minutách se vzorky zalijí do poloviny vodou s tím, že v nádobě je stále podtlak. Po dalších deseti minutách se vzorky zalijí tak, aby byly minimálně 2 cm pod hladinou a vyčkává se dalších 15 minut. Poté se přejde k vážení. Vzorek se pouze otře vlhkým hadříkem a zváží se nasáklý.

2.7.6.1 Výpočetní vztah nasákavosti

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s}$$

NV - nasákavost [%]

m_n - hmotnost vzorků v nasáklém stavu [g]

m_s - hmotnost vzorků v suchém stavu [g]

2.7.7. Pevnost v tahu za ohybu

Byla využita tříbodová metoda. Princip zkoušení tříbodového ohybu spočívá v zatěžování zkušebního tělesa umístěného na dvou podporách umístěných souměrně pod tělesem. Zatěžuje se tlačným válečkem, který působí silou uprostřed vzorku. Sleduje se maximální síla při porušení vzorku. Výsledná pevnost se vypočte ze vztahu uvedeného níže.

2.7.7.1 Výpočetní vztah pevnosti v tahu za ohybu

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

R_f - pevnost v tahu za ohybu [MPa]

F - síla při porušení vzorku [N]

l - vzdálenost podpor [mm]

b - šířka průřezu vzorku [mm]

h - výška průřezu vzorku [mm]

2.7.8. Pevnost v tlaku

Na zlomcích z pevnosti v tahu za ohybu se dále může provést pevnost v tlaku. Z důvodu nepravidelných tvarů zkušebních vzorků se vybírala nejhladší plocha, která se případně dobrousila. Jako zatěžovací plocha bylo uvažováno 20·20 mm z důvodu využitých pomůcek. Princip spočívá v zatěžování vzorku a sledování maximální síly při porušení. Když tuto sílu přepočteme na plochu, dostaneme hodnotu pevnosti.

2.7.8.1 Výpočetní vztah pevnosti v tlaku

$$R_c = \frac{F}{S}$$

R_c - pevnost v tlaku [MPa]

F - síla při porušení vzorku [N]

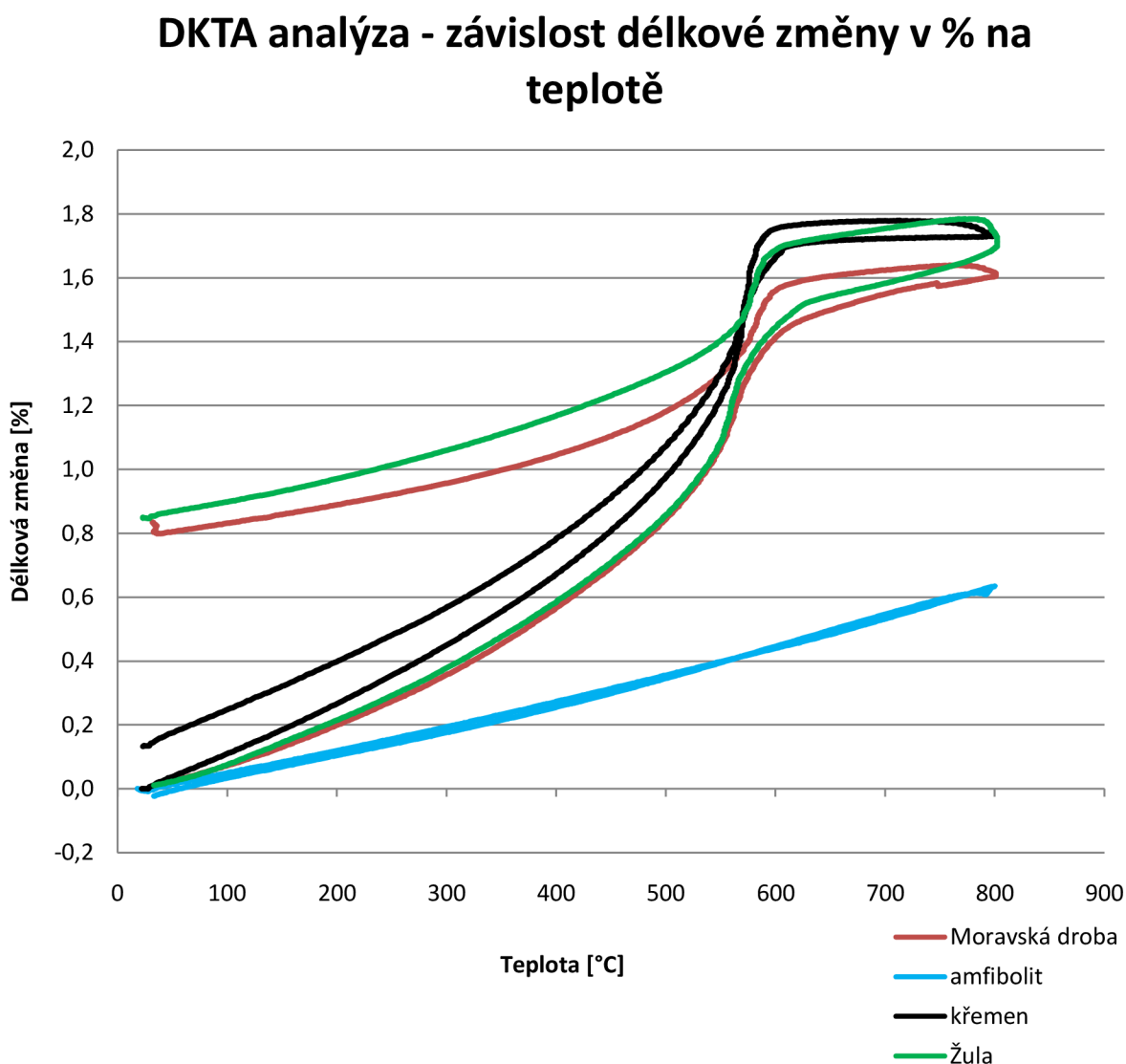
S - tlačná plocha [mm²]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byly zkoumány jednotlivé druhy kameniv a jejich vlastnosti, které by mohly ovlivnit vlastnosti keramického střepu v případě jejich využití jako ostřiva. DKTA analýza byla provedena tak, aby co nejlépe simulovala moderní cihlářskou technologii, tj. výpal s dvouhodinovou izotermickou výdrží na 800 °C.

3.1. Naměřené hodnoty a výsledky

DKTA analýza byla vyhodnocena graficky jako závislost délkové změny v procentech na vypalovací teplotě. Grafy byly následovné:



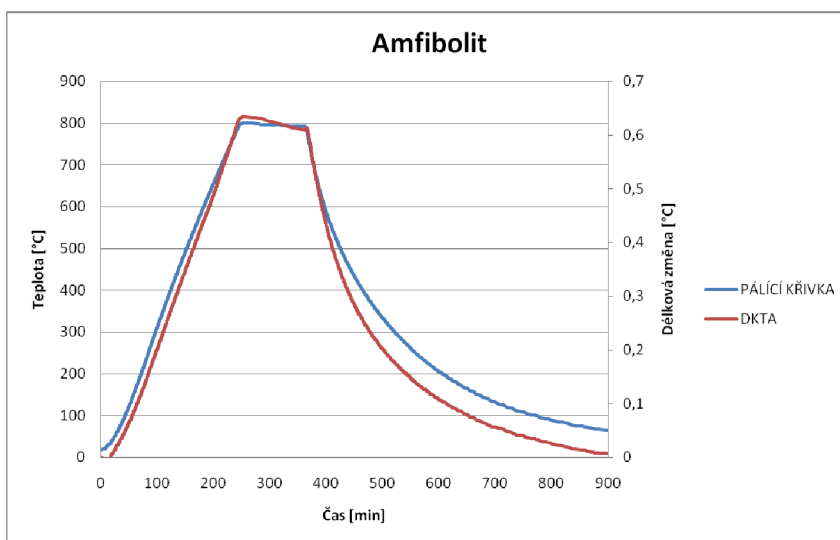
Graf. 1 – Průběh délkových změn vzorků při zvyšování teploty

Vzorky	Počáteční délka L ₀ [mm]	Konečná délka L [mm]
Amfibolit	83,31	83,327
Moravská droba	88,23	88,936
Žula	100,30	101,100
Křemen	88,22	88,398

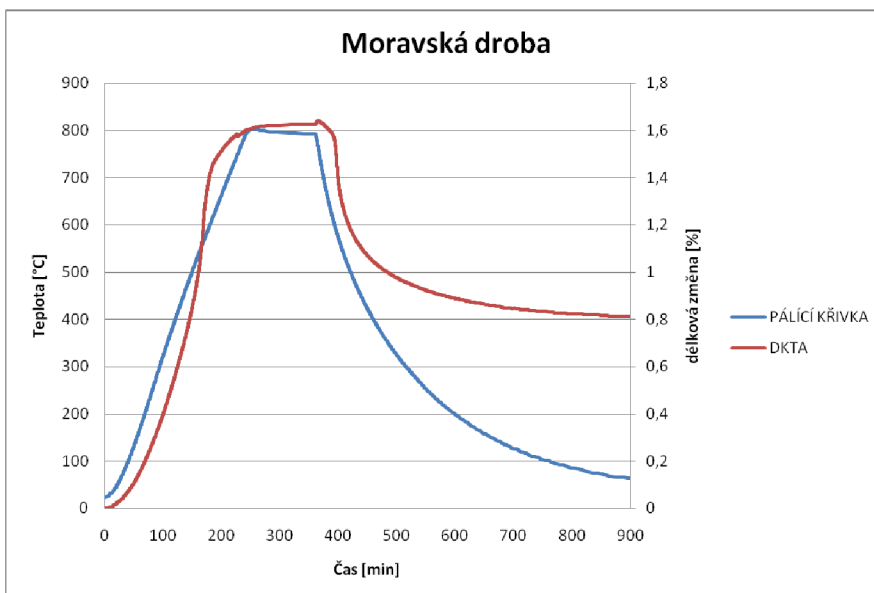
Tab. 5 - Počáteční a konečné rozměry vzorků

Vzorky	Součinitel teplotní roztažnosti α_{30-500} [K ⁻¹]	Součinitel teplotní roztažnosti α_{30-800} [K ⁻¹]
Amfibolit	$7,62 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$
Moravská droba	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$
Žula	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$
Křemen	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$2,24 \cdot 10^{-5}$

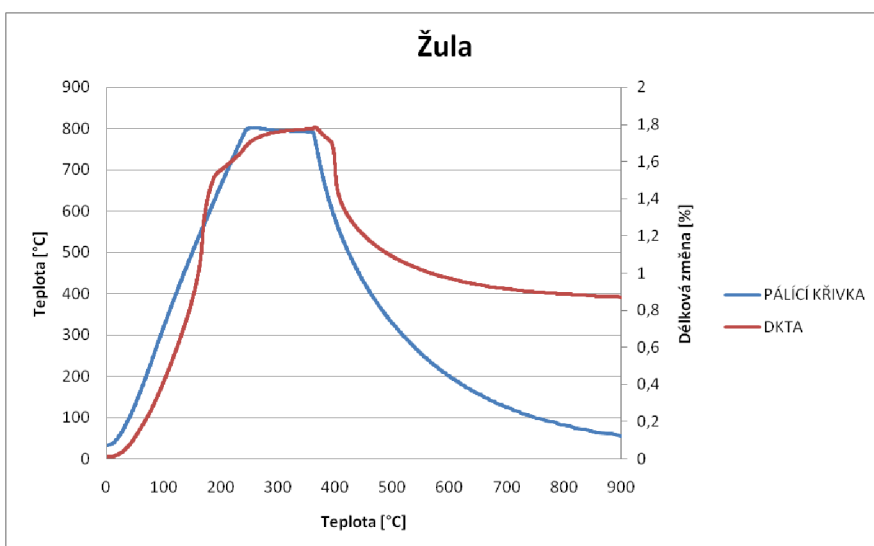
Tab. 6 - Součinitel teplotní roztažnosti



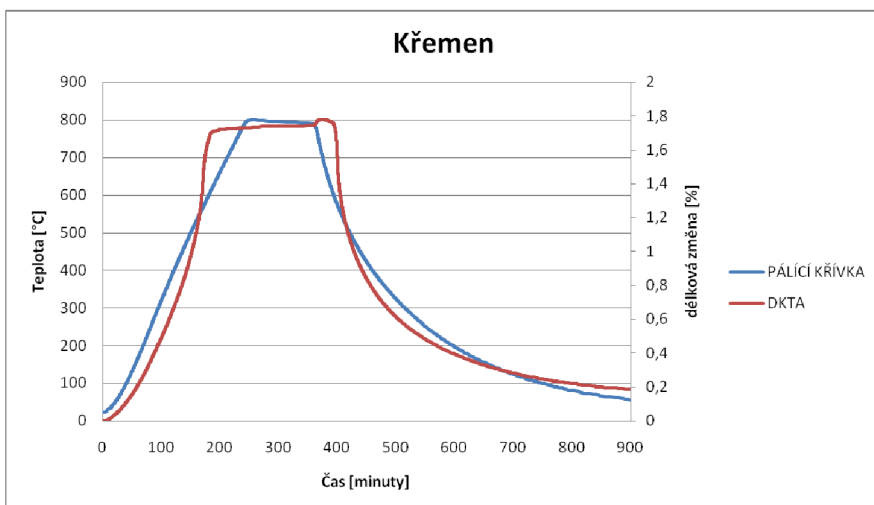
Graf. 2 - Délková změna amfibolitu závislá na teplotě a čase, průběh výpalu



Graf. 3 - Délková změna moravské droby závislá na teplotě a čase, průběh výpalu



Graf. 4 - Délková změna žuly závislá na teplotě a čase, průběh výpalu



Graf. 5 - Délková změna křemene závislá na teplotě a čase, průběh výpalu

Z grafů je patrné, že nejlepší průběh délkové změny v závislosti na teplotě měl vzorek amfibolitu, u kterého se projevila pouze délková tepelná roztažnost materiálu a neproběhly zde žádné modifikační přeměny jako u ostatních vzorků. Vzorek navíc měl celkové smrštění pálením 0,02 %, což ve výsledku znamenalo 0,017 mm. U křemene je nejvíce patrná modifikační přeměna β - křemene na α - křemen. Celkové prodloužení křemene bylo 0,2 %, rozměrově pak 0,178 mm. Žula a moravská droba měly velice podobný průběh i co se do hodnot konečného prodloužení týče. Dosahovaly hodnot prodloužení okolo 0,8 %, délkově pak žula 0,800 mm, moravská droba 0,706 mm.

Grafy závislosti změn na čase a teplotě dokazují, že u amfibolitu se projevila pouze délková teplotní roztažnost (Tab. 6), křivka délkových změn téměř kopíruje pálicí křivku. Na grafech žuly a moravské droby je viditelné velké konečné prodloužení po skončení analýzy. Na pálicí křivce je viditelný záměr o co nejuvěrnější simulaci cihlářské technologie s dvouhodinovou izotermickou výdrží na teplotě 800 °C.

NEVYPÁLENÉ VZORKY				VYPÁLENÉ VZORKY			
VZOREK	m_s [kg]	V [m ³]	OH [kg/m ³]	Vzorek	m_s [kg]	V [m ³]	OH [kg/m ³]
AMFIBOLIT	0,14342	47,5	3020	AMFIBOLIT	0,10434	35	2980
M. DROBA	0,06324	25	2530	M. DROBA	0,06873	27,5	2500
ŽULA	0,11419	43	2660	ŽULA	0,06031	23,5	2570
				KŘEMEN	0,07431	29	2560

Tab. 7 – Vypočtené objemové hmotnosti

NEVYPÁLENÉ VZORKY				VYPÁLENÉ VZORKY			
VZOREK	m_s [kg]	m_n [kg]	NV [%]	Vzorek	m_s [kg]	m_n [kg]	NV [%]
AMFIBOLIT	0,14342	0,14389	0,33	AMFIBOLIT	0,10434	0,10500	0,63
M. DROBA	0,06324	0,06383	0,93	M. DROBA	0,06873	0,07019	2,12
ŽULA	0,11419	0,11464	0,39	ŽULA	0,06031	0,06139	1,79
				KŘEMEN	0,07431	0,07483	0,70

Tab. 8 – Vypočtené nasákavosti

Z Vypočtených hodnot objemových hmotností vyplývá, že nejvyšší objemovou hmotnost má amfibolit, nejnižší pak moravská droba. Všechny vzorky po výpalu dosahovaly nižších hodnot než před výpalem. Největší pokles proběhl u žulového vzorku, a to o 90 kg/m³. K poklesu objemové hmotnosti jistě přispělo zvětšení objemu

vlivem výpalu, jak je vidět na grafech z DKTA analýzy. Nasákavost byla po výpalu větší, než před výpalem, kromě moravské droby se ale udržela u všech vzorků pod 2 %.

NEVYPÁLENÉ VZORKY		VYPÁLENÉ VZORKY	
VZOREK	Pevnost v ohybu [MPa]	VZOREK	Pevnost v ohybu [MPa]
AMFIBOLIT	54,4	AMFIBOLIT	39,1
M. DROBA	24,7	M. DROBA	8,7
ŽULA	27,5	ŽULA	2,4
		KŘEMEN	5,5

Tab. 9 – Vypočtené pevnosti v ohybu

NEVYPÁLENÉ VZORKY			
VZOREK	Pevnost v tlaku [MPa]		Průměr [MPa]
AMFIBOLIT	180,0	197,5	188,8
M. DROBA	83,8	81,3	82,5
ŽULA	115,0	93,8	104,4

Tab. 10 – Vypočtené pevnosti v tlaku nevypálených vzorků

VYPÁLENÉ VZORKY			
VZOREK	Pevnost v tlaku [MPa]		Průměr [MPa]
AMFIBOLIT	145,0	155,0	150,0
M. DROBA	51,3	75,0	63,1
ŽULA	95,0	111,3	103,1
KŘEMEN	135,0	195,0	165,0

Tab. 11 – Vypočtené pevnosti v tlaku vypálených vzorků

Pevnosti v ohybu po výpalu klesly, přičemž nejvýraznější pokles pevností se projevil u žuly, nejmenší u amfibolitu. Žula naopak zaznamenala nejnižší pokles pevnosti v tlaku, ta se téměř nezměnila. Amfibolit z hlediska pevností jak v tlaku, tak i v ohybu projevil nejvyšší hodnoty ze všech testovaných hornin.

3.2. Návrh optimálního ostřiva pro keramický střep

3.2.1. Z hlediska součinitele tepelné vodivosti

Literatura často uvádí široké rozptyly hodnot součinitele tepelné vodivosti pro horniny. V jedné obsáhlé vědecké studii, která provedla mnoho testů, byly uvedeny přibližné hodnoty testovaných hornin, které by mohly sloužit jako alternativa klasického křemenného písku jako ostřiva. [19]

- žula - 2,68 W/m·K;
- amfibolit - 2,39 W/m·K;
- moravská droba - 4,40 - 6,05 W/m·K;
- křemen - 5 W/m·K. [19]

Podle mého zdroje [19] má křemen poměrně vysoký součinitel tepelné vodivosti oproti ostatním horninám. Nejnižší hodnoty dosahuje amfibolit, nicméně žula dosahuje velice podobné hodnoty. Pro porovnání, beton má přibližný součinitel tepelné vodivosti 1,5 W/m·K. Nízká hodnota součinitele tepelné vodivosti u amfibolitu byla překvapující, protože v experimentální části byla prokázána jeho vysoká objemová hmotnost a v závislosti se zvyšující se objemovou hmotností součinitel tepelné vodivosti většinou roste. [19]

Součinitel tepelné vodivosti moderní cihelné tvarovky bez izolační výplně v dutinách může být někde okolo 0,098 W/m·K (Porotherm 50 EKO+ Profi). [20]

3.2.2. Z hlediska pevnosti

Co se týče mnou provedeného experimentu, nejlepších pevností v ohybu dosahoval amfibolit dle předpokladu, neboť se jedná o metamorfovanou horninu. Z rešerše zahraničních článků je patrné, že žula a rula si vedla s ohledem na pevnosti dobře. Horší situace nastala s muskovit žulovým odpadem, který pevnost snižoval.

Pevnosti v tlaku v experimentální části této práce vycházely obdobně jako v tahu za ohybu.

Nejlepší pevnosti měl amfibolit a moravská droba trochu zaostávala.

Zahraniční články prezentují různé výsledky pevností v tlaku. Ve všech případech ale dosahovaly testované vzorky minimálních hodnot potřebných pro průmyslové využití, ať se jednalo o žulu, rulu nebo mramor v kombinaci se žulou.

3.2.3. Z hlediska ceny

Cena je velice proměnlivý faktor v závislosti na vzdálenosti od případného výrobního provozu. Doprava tvoří značnou část nákladů. Odpadní frakce, která se v posledních letech v lomech hromadí, bude ale vždy levnější varianta v ceně za tunu, než cíleně těženy pískem. [23]

Cihlárna Tondach již dnes využívá výsivku frakce 0/2 mm z nedalekého kamenolomu Luleč a včetně dopravy se její cena pohybuje okolo 100 Kč/t. Cena ale nebyla rozhodujícím faktorem, tím bylo snížení citlivosti k sušení. Snížení množství vytvářecí vody má totiž zásadní význam na vlastnosti.

Pokud snížíme citlivost k sušení, nebo dokážeme upravit i pálicí proces v náš prospěch, můžeme ušetřit finance na energiích. [23]

Po provedených zkouškách bych pro vysoké pevnosti navrhnul jako ideální ostřivo amfibolit, který dosahoval ve všech zkoumaných i zjištěných parametrech nejlepších výsledků. Za jedinou negativní vlastnost amfibolitu se dá považovat jeho vysoká objemová hmotnost oproti ostatním zkoumaným minerálům, která by mohla zhoršit tepelně izolační vlastnosti výsledných výrobků. Množství, ve kterém bych ho navrhnul přidávat k ostatním surovinám v cihlářské výrobě, je 30 %, protože na tomto množství se shoduje většina zahraničních publikací zabývajících se tématem těchto alternativních druhů ostřiv. Dle mého názoru by ale bylo třeba utvořit vzorky ze všech vstupních keramických surovin a otestovat jejich vlastnosti, aby se dokázalo, zda se vlastnosti samotných hornin projeví i v cihlářském střepu.

4. ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na využívání výsivky, tedy frakce 0/4 mm drceného kameniva bez deklarace vlastností a velikosti částic, která vzniká v lomařství. Práce mapovala její využití v cihlářství a vliv na vlastnosti výsledných produktů. Moderní technologie průmyslové výroby cihlářských výrobků hledá nové řešení, jak snížit náklady s udržení současné kvality, nebo jak využít dostupné alternativní suroviny, jako je právě kamenná prosívka a odpad vznikající při řezání a broušení kamene ke zlepšení vlastností výrobků.

Literární rešerše dle mého názoru dokázala použitelnost a využívání těchto alternativních ostřiv, dokázala ale i pozitivní vliv na výsledné vlastnosti cihlářských výrobků. Zejména v oblasti citlivosti k sušení a rozměrové stálosti výrobků byly výsledky vždy pozitivní. V některých případech dokonce došlo v porovnání s klasicky používaným křemenným pískem k ještě mírně lepším vlastnostem. Bohužel, co se týká pevností, nelze konstatovat, že výsivka má vždy pozitivní vliv na pevnosti výrobků. V některých případech došlo ke zvýšení pevností, v některých ke snížení. Tento jev bych odůvodnil různorodou vznikající mikrostrukturou, velikostí částic a chemickým složením používaných odpadů a jílu. Proto si myslím, že používání prosívek z důvodu zvýšení pevnosti, nebo snížení vypalovací teploty při zachování stejných pevností není možné ve všech případech. Záleží na kompatibilitě používaných surovin a také na dostupnosti.

Kamenolomy si již jsou vědomy využitelností prosívek a fillerů, pořád ale těchto frakcí a odpadů vzniká velké množství. Jedna kapitola se zabývá historickou keramikou, která obsahovala ostřivo na jiné než křemenné bázi, přesněji byl nalezen pyroxen a amfibol. Výzkumem se prokázalo, že tento počín byl záměrný. Dost možná by se tedy dalo o tomto tématu dozvědět více i z historických pramenů, často nově bádáme nad otázkami, které již byly vybadány.

V praktické části byla provedena DKTA analýza různých druhů hornin, u kterých je potenciál, aby se staly alternativním cihlářským ostřivem. Na nevypálených a vypálených vzorcích hornin se dále testovaly jejich vlastnosti. Z hlediska pevností a průběhu DKTA analýzy byl jednoznačně nejvhodnější amfibolit. V dnešní době je ale

trendem dbát také na tepelně izolační vlastnosti stavebních materiálů a z důvodu nejvyšší objemové hmotnosti amfibolitu si nejsem jistý o jeho použitelnosti. Při zkoumání součinitele tepelné vodivosti hornin v jedné publikaci byla uvedena poměrně nízká hodnota amfibolitu při porovnání s ostatními testovanými horninami.

Závěrem navrhuji, z důvodu, že jsem nenacházel velké množství podobných vědeckých publikací, zabírat se dále vlivem kamenné prosívky na součinitel tepelné vodivosti výrobku a kompatibilitu s průmyslově užívanými lehkivými. Dále do jaké míry se projeví objemová hmotnost ostřiva na tepelně izolačních vlastnostech výrobku.

5. POUŽITÉ ZDROJE

- [1] LACH, Vladimír. *Mikrostruktura stavebních látek*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991.
- [2] SOKOLÁŘ , R. *Keramika*. Modul BJ01-M01. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 176 s.
- [3] LACH, Vladimír. *Keramika*. 3. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0332-2.
- [4] NEVŘIVOVÁ, L. *TECHNICKÁ TERMODYNAMIKA, MODUL BJ11 M06 SUŠENÍ*. 2006. s. 1-56.
- [5] BUDNIKOV, Petro Petrovyč. *Technologie keramiky a žáruvzdorného zboží*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [6] SUK, Vojtěch. *Bigotova křivka jako nástroj pro posuzování vlastností plastického těsta*. Brno, 2014. 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.
- [7] SOKOLÁŘ , R., SMETANOVÁ, L. *Keramika – laboratoře*. Modul BJ02-M01. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 120 s.
- [8] MONTEIRO, S.N., L.A. PEÇANHA a C.M.F. VIEIRA. Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operations. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2004, 24(8), 2349-2356 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/S0955-2219(03)00638-1. ISSN 09552219. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221903006381>
- [9] NEVŘIVOVÁ, L. *SPECIÁLNÍ KERAMIKA , MODUL BJ14 M04 ŽÁROVZDORNÉ MATERIÁLY*. 2006. s. 1-68.
- [10] VOKÁČ, MIROSLAV, et al. Dilatometric Analysis of Ceramic Roof Tiles for Determining Irreversible Moisture Expansion. *Ceramics-Silikáty*, 2009, 53.4: 231-314.
- [11] ACCHAR, Wilson, Francisco A. VIEIRA a Ana M. SEGADÃES. Using ornamental stone cutting rejects as raw materials for red clay ceramic products: Properties and microstructure development. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2006, 435-436, 606-610 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/j.msea.2006.07.091. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092150930601481X>

- [12] ROMUALDO RODRIGUES MENEZES, LISIANE NAVARRO L. SANTANA, GELMIRES ARAÚJO NEVES AND HEBER CARLOS FERREIRA (2012). Recycling of Mine Wastes as Ceramic Raw Materials: An Alternative to Avoid Environmental Contamination, Environmental Contamination, Dr. Jatin Srivastava (Ed.), ISBN: 978-953-51-0120-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/environmental-contamination/recycling-of-mine-wastes-as-ceramic-raw-materials-an-alternative-to-avoid-environmental-contaminatio>
- [13] VIEIRA, C.M.F. a S.N. MONTEIRO. Effect of grog addition on the properties and microstructure of a red ceramic body for brick production. *Construction and Building Materials* [online]. 2007, 21(8), 1754-1759 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.013. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061806001814>
- [14] MENEZES, Romualdo R., Heber S. FERREIRA, Gelmires A. NEVES, Helio de L. LIRA a Heber C. FERREIRA. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2005, 25(7), 1149-1158 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.04.020. ISSN 09552219. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221904002183>
- [15] SOUZA, A.J., B.C.A. PINHEIRO a J.N.F. HOLANDA. Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles. *Journal of Environmental Management* [online]. 2010, 91(3), 685-689 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.09.032. ISSN 03014797. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479709003363>
- [16] HOJAMBERDIEV, Mirabbos, Ashraf EMINOV a Yunhua XU. Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles. *Ceramics International* [online]. 2011, 37(3), 871-876 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2010.10.032. ISSN 02728842. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884210004542>
- [17] PŘICHYSTAL, Antonín - Minerály těšínitů jako ostřivo v keramice púchovské kultury na výšinné lokalitě Okrouhlá u Staříče nedaleko Frýdku-Místku. Přichystal, Antonín. In: *Ve službách archeologie. 6. Sborník věnovaný 70. narozeninám PhDr. Dariny Bialekovéj, CSc. a 60. narozeninám Prof. PhDr. Josefa Ungera, CSc / Brno : Muzejní a vlastivědná společnost, 2005 s. 203-208.*

- [18] VONDŘÍČKOVÁ, Veronika. *Uplatnění kamenné prosívky jako ostřiva ve střepe pálených střešních tašek: diplomová práce*. Brno, 2012. 93 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
- [19] LEV EPPELBAUM, Izzy Kutasov. *Applied geothermics*. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 9783642340239.
- [20] *Technické údaje na www.wienerberger.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://wienerberger.cz/produkty/porotherm-50-eko-profi#collapse-collapse1366232729722>
- [21] POSPÍŠIL, Pavel. *GEOLOGIE MODUL BF01-M01: ZÁKLADY PETROLOGIE NAUKY O HORNINOVÉM PROSTŘEDÍ*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004.
- [22] SOKOLÁŘ, Radomír. *Protokol číslo: 10/03/1586: Optimalizace surovinové směsi pro výrobu tepelně izolačních tvarovek KERATHERM*. Brno, 2010.
- [23] *Ceník kameniva Luleč 2016* [online]. In: . 2016, s. 1 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cms/provozovny/lulec>

6. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázky

Obr. 1 - Bigotova křivka [7]

Obr. 2 - Winklerův diagram [7]

Obr. 3 - Smrštění sušením jednotlivých receptur [8]

Obr. 4 - Pálicí křivka [2]

Obr. 5 - Fázový diagram křemene [9]

Obr. 6 - Délková roztažnost při přidavku různých podílů testovaných ostřiv (žula, žula + mramor) [11]

Obr. 7 - Smrštění pálením v závislosti na různých vypalovacích teplotách [11]

Obr. 8 - Smrštění v závislosti na vypalovací teplotě [8]

Obr. 9 - Nasákavost vzorků bez a s přidavkem žulového odpadu, klesá se zvyšující se vypalovací teplotou klesá [8]

Obr. 10 - Ukázka pozitivního vlivu přidavku odpadní frakce ruly z jednoho brazilského lomu [15]

Obr. 11 - Pevnost v ohybu s přidavkem 30 % alternativního ostřiva [11]

Obr. 12 - Pevnost v ohybu v závislosti na přidaném obsahu ruly [15]

Obr. 13 - Pevnost v tlaku klesající se zvyšujícím se obsahem žulového odpadu [14]

Obr. 14 - Broušení a řezání žulových bloků [12]

Obr. 15 - Hromadění jemných odpadních podílů [12]

Obr. 16 – Zkoumané vzorky historické keramiky s viditelnými velkými krystaly [17]

Obr. 17 - vzorky použité na DKTA analýzu v praktické části

Tabulky

Tab. 1 - složení zkušebních receptur [8]

Tab. 2 - Tabulka chemického složení žulového odpadu [8]

Tab. 3 – Tabulka chemického složení žuly a žuly s mramorem [11]

Tab. 4 – Tabulka chemického složení muskovit - žulového odpadu [16]

Tab. 5 - Počáteční a konečné rozměry vzorků

Tab. 6 - Součinitel teplotní roztažnosti

Tab. 7 – Vypočtené objemové hmotnosti

Tab. 8 – Vypočtené nasákavosti

Tab. 9 – Vypočtené pevnosti v ohybu

Tab. 10 – Vypočtené pevnosti v tlaku nevypálených vzorků

Tab. 11 – Vypočtené pevnosti v tlaku vypálených vzorků

Grafy

Graf. 1 – Průběh délkových změn vzorků při zvyšování teploty

Graf. 2 - Délková změna amfibolitu závislá na teplotě a čase, průběh výpalu

Graf. 3 - Délková změna moravské droby závislá na teplotě a čase, průběh výpalu

Graf. 4 - Délková změna žuly závislá na teplotě a čase, průběh výpalu

Graf. 5 - Délková změna křemene závislá na teplotě a čase, průběh výpalu