



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# VÝROBA KERAMICKÝCH FILTRŮ Z POHLEDU ZPŮSOBU VYTVÁŘENÍ

THE TECHNOLOGY OF CERAMIC FILTERS AS A PROBLEM OF THEIR SHAPING

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martina Dobrovolná

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

BRNO 2017



# 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	Martina Dobrovolná
Název	Výroba keramických filtrů z pohledu způsobu vytváření
Vedoucí práce	doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

---

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

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

- [1] Hanykýř V., Kutzendörfer J., Technologie keramiky, Vega s.r.o. 2000, ISBN 80-900860-6-3.  
[2] Sokolář, R. Keramika/Modul BJ01-M01. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, [2006], 176 s.  
[3] Sokolář, R., Smetanová, L. Keramika – laboratoře/Modul BJ02-M01. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, [2006]. 120 s.  
[4] Pytlík, P., Sokolář, R. Stavební keramika. Technologie, vlastnosti a využití. CERM Brno 2002, ISBN 80-7204-234-3.  
[5] Valenta, L. Keramická příručka. Vydavatelství technické literatury. Horní Maršov, 1999.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Keramické filtry jsou používány pro filtraci taveniny slitin neželezných kovů (teploty lití do 1000 °C), litiny a oceli. V prostředí firmy Keramtech s.r.o. jsou tyto filtry standardně vyráběny z plastického těsta a je snahou zavést i technologii suchého lisování.

Cílem bakalářské práce je:

- posoudit možnost výroby keramických filtrů suchým lisováním a zdůraznit její výhody a nevýhody,
- porovnat stávající technologii výroby keramických filtrů z plastického těsta a lisováním ze suché směsi,
- popsat základní požadavky na keramické filtry a uvést metodiku jejich zkoušení,
- formou rešerše zhodnotit zejména vliv lisovací vlhkosti na kvalitu za sucha lisovaného keramického střepu,
- v rámci praktické části bakalářské práce posoudit vliv vlhkosti používaného lisovacího granulátu na základní fyzikálně mechanické vlastnosti keramických filtrů stanovené na výsušku (pevnost, objemová hmotnost) a vypáleném střepu (nasákavost, objemová hmotnost, zdánlivá pórovitost, zdánlivá hustota, pevnost) v podmínkách technologie výroby firmy Keramtech s.r.o. a navrhnout optimální hodnotu lisovací vlhkosti.

Doporučený rozsah práce 40 - 50 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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**

**ČJ**

Cílem této bakalářské práce je zhodnotit možnost výroby keramických filtrů suchým lisováním a vybrat vhodný granulát a jeho optimální vlhkost vhodnou pro tento způsob výroby. V teoretické části bakalářské práce je vysvětlen význam používání keramických filtrů ve slévárenství. Dále je zde přiblížena technologie výroby keramických směsí a technologie vytváření keramických filtrů přetokovým lisováním a suchým lisováním. V praktické části je popsán postup výroby a zkoušení zkušebních vzorků. Porovnává se vliv různých druhů keramických směsí, vlhkostí směsí a různých režimů výpalu na fyzikálně-mechanické vlastnosti keramického střepu. Výstupem bude navrhnout hmotu o dané vlhkosti, která by byla vhodná pro vytváření suchým lisováním.

**ENG**

The aim of this bachelor thesis is to evaluate possible production of ceramic filters made by dry pressing and to choose suitable granulate and its optimal moisture proper for this way of production. The theoretical part of the thesis explains the meaning of the usage of ceramic filters in a foundry industry. Further more, the technology of ceramic mixtures production and the technology of ceramic filters production made by wet pressing and dry pressing is drawn near in this thesis. The practical part describes the production process and the testing of experimental samples. The influence of different kinds of ceramic mixtures, their moisture and different modes of burning is compared to physical-mechanical features of ceramic potsherd. The output is to design a material with a set of typical features which would be suitable for dry pressing production.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

**ČJ**

keramické filtry, vytváření, suché lisování, přetokové lisování, granulát, vlhkost

**ENG**

ceramic filters, shaping, dry pressing, wet pressing, granulate, moisture

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Martina Dobrovolná *Výroba keramických filtrů z pohledu způsobu vytváření*. Brno, 2017. 47 s., 7 s. 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 zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....

Podpis autora

Martina Dobrovolná

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Radomíru Sokolářovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Dále děkuji technologovi firmy Keramtech s.r.o., Mgr. Martinu Janíčkoví za odborné rady a možnost zpracovat část bakalářské práce v prostředí firmy.

## **OBSAH**

1	úvod.....	10
2	filtrace kovů .....	11
2.1	slévárenské chyby v odlitcích.....	11
2.2	metody separace inkluzí.....	11
2.2.1	úprava vtokové soustavy .....	11
2.2.2	metalurgické metody .....	12
2.2.3	filtrace .....	12
2.3	mechanismus filtrace .....	13
3	lisované filtry.....	15
3.1	keramické hmoty pro výrobu keramických filtrů.....	15
3.2	požadavky na filtry.....	16
3.3	metodika zkoušení filtrů .....	16
3.3.1	dynamická zkouška filtru.....	16
3.3.2	tepelná kapacita filtru.....	17
3.3.3	stanovení odporu filtrů ve vtokové soustavě .....	17
3.3.4	účinnost filtrů z hlediska zachycování inkluzí.....	18
4	technologie přípravy keramických směsí .....	18
4.1	zdrobňování keramických surovin .....	18
4.1.1	mletí keramických směsí.....	18
4.2	odvodňování.....	20
4.2.1	kalolisování .....	20
4.2.2	rozprachové sušení .....	21
4.2.3	porovnání kalolisování a rozprachového sušení.....	22
5	technologie výroby keramických filtrů.....	23



5.1	mechanismus zhutňování .....	23
5.2	zákonitosti lisování .....	24
5.3	lisování z vlhké směsi .....	26
5.4	suché lisování.....	26
5.5	porovnání vlhkého a suchého lisování .....	29
5.6	vliv různých aspektů na kvalitu za sucha lisovaných výrobků.....	29
6	sušení .....	32
7	výpal.....	32
8	praktická část .....	33
8.1	použité suroviny .....	33
8.2	příprava vzorků.....	34
8.3	stanovení skutečných rozměrů .....	35
8.4	fyzikálně-mechanické zkoušky na zkušebních vzorcích.....	35
8.5	vyhodnocení a diskuze výsledků .....	38
9	závěr .....	42
	seznam použitých zdrojů.....	44
	seznam zkratk.....	47
	seznam příloh.....	47

# 1 ÚVOD

V dnešní vyspělé době se kladou vysoké požadavky na kvalitu kovových odlitků. Kvalita výrobků se v historii zvyšovala například úpravou vtokové soustavy, v dnešní době se úspěšně využívá filtrace. K filtraci se používají keramické filtry vkládané do vtokové soustavy, a to nejčastěji filtry pěnové nebo lisované. Právě lisovanými filtry, vyráběnými společností Keramtech s.r.o., se zabývá tato bakalářská práce. Keramické filtry dokážou zachytit na povrchu i ve svém objemu nežádoucí inkluze, které by jinak vnikly do odlitku a narušily jeho kvalitu. Mimo to také uklidňují tok taveniny, což přispívá k ještě vyšší kvalitě odlitků.

Výroba lisovaných keramických filtrů probíhá ve firmě Keramtech s.r.o. přetokovým lisováním z drolenky, tedy směsi o vlhkosti 15 – 18 %. Tuto směs si vyrábí sami z jílu, bentonitu a lupku. Suroviny se nejdříve melou za mokra v bubnovém mlýně. Odvodňují se pomocí kalolisů a vzniklé koláče se dále dosouší. Suché koláče se drtí v kolovém mlýně, před lisováním se vzniklá sypká směs vlhčí a vzniká drolenka. Výrobky se lisují tlakem do 30 MPa.

Z důvodů zlevnění výroby, zkrácení průběžné doby výroby a rozšíření portfolia výrobků je snaha zavést technologii suchého lisování. V teoretické části bakalářské práce jsou obě technologie výroby popsány a je provedeno jejich porovnání. Pro experimentální část byly technologem firmy vybrány čtyři granuláty pro výrobu zkušebních vzorků. Po stanovení základních fyzikálně-mechanických vlastností se provedlo zhodnocení výsledků a byl navržen vhodný granulát, použitelný pro další experimenty.

## **2 FILTRACE KOVŮ**

Již v počátcích užívání roztaveného kovu pro výrobu různých předmětů bylo důležité zajistit kvalitu výsledného odlitku. V minulosti se ovšem nedařilo účinně eliminovat z kovové taveniny nežádoucí vměstky, které způsobovaly problémy jak při samotném odlévání, tak i při následném zpracování odlitku. Až ve 30. letech 20. století se díky znalostem o proudění kapalin a experimentálním zkušenostem začaly dimenzovat konstrukce vtokových soustav. Aby byly slévárny v dnešní době, kdy jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu výrobků, konkurenceschopné, je filtrace kovů neodmyslitelnou součástí technologie jejich výroby. [1]

### **2.1 SLÉVÁRENSKÉ CHYBY V ODLITCÍCH**

Vznik slévárenských chyb je závislý na mnoha faktorech. Mezi nejčastější chyby patří výskyt inkluzí neboli vměstků. Inkluze se podle způsobu vzniku rozdělují na endogenní a exogenní. Pro kvalitu odlitku je velmi důležitá správná úprava taveniny v peci nebo i mimo ni. V případě nesprávné úpravy se mohou vyskytovat endogenní inkluze vznikající při krystalizaci taveniny. Také styk roztaveného kovu s atmosférou může vyvolat vznik endogenních inkluzí vlivem reoxidace. Jako příklad exogenních inkluzí můžeme uvést vniknutí částic primární strusky, písku nebo erodované vyzdívky pecí do dutiny formy společně s kovem. Tyto inkluze vznikají erozním působením taveniny. Inkluze se mohou vyskytovat jak v tuhém, tak i v tekutém nebo vazkém stavu. Další dělení vměstků je podle původu na kovové a nekovové. Vměstky mají negativní vliv na kvalitu povrchu odlitku, zhoršují mechanické vlastnosti a obrobitelnost. U odlitků namáhaných tlakově se projevuje netěsnost v místě podél vměstku. [1] [2]

### **2.2 METODY SEPARACE INKLUZÍ**

#### **2.2.1 ÚPRAVA VTOKOVÉ SOUSTAVY**

Tato metoda je založena na principu vyplavení inkluzí na povrch taveniny. Zde se využívá faktu, že inkluze mají nižší hmotnost než odlévaný kov. Tohoto principu se využívalo již při prvních pokusech redukovat množství vměstků vniknutých do dutiny formy. Vhodnou úpravou tvaru vtokové jamky dochází ke vzniku kombinovaného víření při vlévání kovu, tím inkluze vyplavou na povrch taveniny a zamezí se tak vniknutí do

licího kanálu. Dalšími možnostmi jsou zachycení vměstků ve struskových kanálech, metoda lití spodem pánve a metoda lití přes sifonovou pánev. [2]

### **2.2.2 METALURGICKÉ METODY**

Druhou skupinou jsou metalurgické metody oddělení vměstků. Například odplynění se provádí profukováním taveniny plynem. Pro vysoce kvalitní odlitky se využívá metody vakuového indukčního tavení. Omezit vměstky lze také použitím kontrolované atmosféry, struskovým přetavováním a dalšími metodami. Metalurgických metod separace inkluzí je celá řada a není cílem této bakalářské práce se tím zabývat podrobněji. [2]

### **2.2.3 FILTRACE**

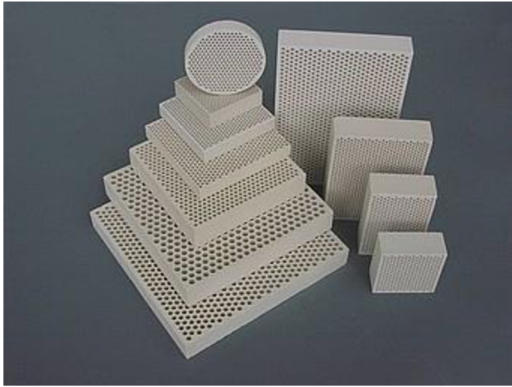
Třetí možností eliminace inkluzí je filtrace. V minulosti se používala například drátěná pletiva nebo ocelová vlna. V současné době je nejpoužívanější filtrace přes keramické filtry, které se umísťují do vtokové soustavy. Dle tvaru se filtry dělí do dvou kategorií:

- Ploché filtry, u kterých se uplatňuje hrubá filtrace, tedy cezení a konečná filtrace, tzn., že se tvoří filtrační koláč na povrchu filtru.
- Objemové filtry, u nichž se využívá kromě výše uvedených mechanismů filtrace ještě třetí, a to hloubková filtrace.

O mechanismech filtrace se podrobněji pojednává v kapitole 2.3.

Podle technologie výroby se filtry rozdělují následovně: [2]

- lisované filtry
- pěnové filtry
- extrudované filtry
- labyrintové filtry
- flexil filtry
- TMT – filtry



Obr. 2.1: Lisované filtry [3]



Obr. 2.2: Pěnové filtry [30]



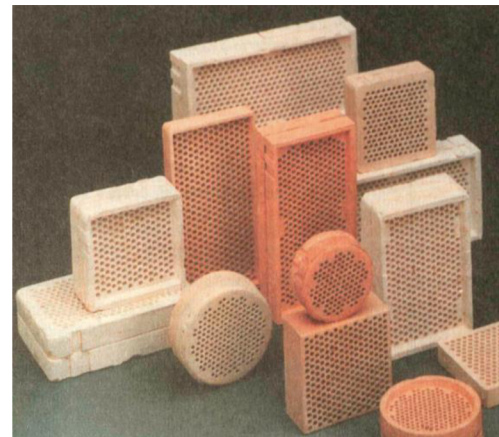
Obr. 2.3: Extrudované filtry [3]



Obr. 2.4: Flexil filtry [29]



Obr. 2.5: Labyrintové filtry [2]



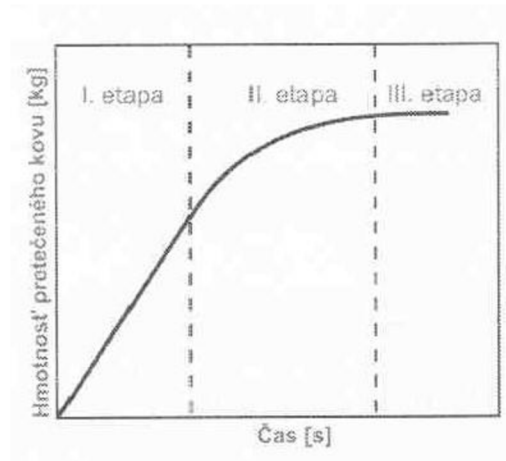
Obr. 2.6: TMT filtry [2]

## 2.3 MECHANISMUS FILTRACE

Filtrace je definovaná jako proces oddělení tuhých částí od tekuté fáze. Při tomto procesu se částice tuhé látky zachytí na filtru a tekutá fáze, tedy tavenina, protéká přes

filtr. Společně s tuhými částicemi se v tavenině vyskytují i částice ve vazkém stavu, tyto se zachycují přilnutím na stěnu filtru.

Časový průběh toku taveniny je možno rozčlenit do třech etap.

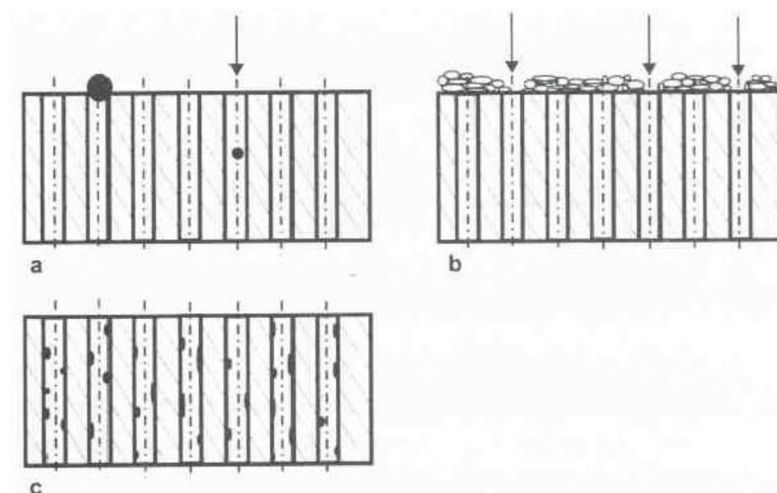


Obr. 2.7: Časový průběh filtrace [2]

První etapa je charakteristická konstantní rychlostí toku kovu a doba, po kterou je rychlost konstantní, se označuje jako životnost filtru. Ve druhé etapě dochází k postupnému ucpání filtru, tudíž se rychlost průtoku snižuje. Ve třetí etapě už je filtr zcela ucpáný.

Podle způsobu separace tuhých částic rozlišujeme tři mechanismy filtrace: [1] [2]

- a) Hrubá filtrace (cezení)
- b) Konečná filtrace (vytvoření filtračního koláče)
- c) Hlubková filtrace



Obr. 2.8: Mechanismy práce keramických filtrů [2]

Při hrubé filtraci se zachytí pouze částice, které jsou větší než otvory ve filtru, tzn. pouze makroskopické částice, jako je písek, rozplavené nátěry apod.

Tvorba filtračního koláče je přirozeným pokračováním hrubé filtrace na přítokové straně filtru. Na již usazených hrubých nečistotách se usazují menší částice, které postupně zpomalují tok taveniny a může dojít k ucpání filtru a tím k úplnému zastavení toku kovu. Velikost usazených částic může dosahovat 1-5  $\mu\text{m}$ .

Hlubková filtrace se uplatňuje u objemových filtrů. Vlivem adheze dochází k nalepování inkluzí na stěny filtru a ke shlukování inkluzí mezi sebou. Adhezní síly musí být větší než dynamické účinky proudu taveniny. Účinnost hlubkové filtrace je dána teplotou kovu, smáčivostí filtru a inkluzí a tvarem otvorů ve filtru. Pro úspěšnou separaci musí být povrch filtru i inkluze v roztaveném kovu nesmáčivé. Z hlediska tvaru otvorů je v přímém otvoru lisovaného filtru nižší pravděpodobnost zachycení vměstku než u pěnových filtrů, kde je kov s materiálem filtru v častějším kontaktu. [1] [2] [3]

### **3 LISOVANÉ FILTRY**

Firma Keramtech s.r.o. se zabývá výrobou keramických lisovaných filtrů. V současné době se lisují z vlhké směsi, tzv. drolenky, pomocí kovového nástroje, který je schopen vylišovat výrobek přímo s otvory daného průměru. Tvarově jsou to filtry objemové, obvykle kruhového, čtvercového nebo obdélníkového průřezu v závislosti na konkrétní lici soustavě, do které bude filtr vsazen. Filtry mají ve své hmotě přes celou výšku otvory kruhového průřezu. Počet otvorů a jejich průměr, stejně jako materiál na výrobu filtru se volí dle druhu odlévaného kovu a jeho teploty lití. Výška filtrů se pohybuje v rozmezí 6,5 - 25 mm a průměr otvorů 1,5 - 3,9 mm po výpalu. U lisovaných filtrů se uplatňují všechny tři mechanismy filtrace, a to hrubá, konečná a hlubková filtrace, jak již bylo uvedeno výše. [2] [4]

#### **3.1 KERAMICKÉ HMOTY PRO VÝROBU KERAMICKÝCH FILTRŮ**

Již víme, že pro lití různých kovů jsou vhodné různé typy keramiky pro výrobu filtrů. Filtry jsou při odlévání vystaveny zároveň mechanickému, tepelnému i chemickému namáhání, proto musí být vyrobeny z takového materiálu, který bude vůči tomuto komplexnímu namáhání odolný. Pro filtraci šedé a tvárné litiny, bronzu a jiných barevných kovů se používá hmota Pyrostat C510, která je odolná do 1500 °C.

Z hlediska chemického složení je hmota na bázi zhruba 50 %  $\text{SiO}_2$ , 40 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Hliník se filtruje přes filtry z hmoty Pyral 15, která je z chemického a mineralogického pohledu totožná s hmotou Pyrostat, ale je vylehčená. Vyznačuje se termicko-mechanickou odolností do 850 °C. Hmota RK5 na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , je určena pro filtraci uhlíkových a nerezových ocelí, společně s hmotou Pyral 15 je vyvinutá v prostředí firmy [2] [5]

### **3.2 POŽADAVKY NA FILTRY**

Aby byla zaručena správná funkčnost filtrů, musí splňovat určité požadavky, které jsou na ně kladeny. Jedná se zejména o:

- Odolání prvotnímu dynamickému nárazu taveniny
- Odolání tepelnému šoku. Při kontaktu s kovem se filtr prudce zahřeje z teploty okolí téměř na teplotu roztaveného kovu.
- Odolání erozivnímu působení taveniny. Pokud by filtr nebyl odolný proti tomuto namáhání, staly by se erodované části exogenními inkluzemi.
- Optimální tepelnou kapacitu, aby se zabránilo ochlazení a následnému zatuhnutí kovu ve vtokové soustavě.
- Dostatečnou filtrační účinnost, což je primární důvod použití filtrů.
- Omezení erozivního působení na stěny formy. Filtr dokáže zklidnit proud taveniny z turbulentního proudění na laminární.
- Mechanickou odolnost.
- Chemickou stálost. Filtry jsou vystaveny korozivním účinkům strusky a taveniny. [2]

### **3.3 METODIKA ZKOUŠENÍ FILTRŮ**

Pravidelně se provádí dynamická zkouška filtru, a to při každé změně šarže ostřiva. Dále je možné zjišťovat tepelnou kapacitu filtru, odpor filtru ve vtokové soustavě a účinnost filtru z hlediska zachycování inkluzí. Vzhledem ke stabilní receptuře hmot a způsobu výroby filtrů se tyto zkoušky běžně neprovádí.

#### **3.3.1 DYNAMICKÁ ZKOUŠKA FILTRU**

Ve skutečném provozu jsou filtry vystaveny dynamickému účinku proudu kovu a současně teplotnímu šoku. Laboratorními podmínkami ani statickými zkouškami nelze tyto účinky napodobit. Dynamická zkouška se tedy provádí tak, že se pod zásobník



kovu a jádro vtokového kůlu osadí filtr do vodorovné polohy uložením na dvě protilehlé strany. Kov tak po vyjmutí zátky ze zásobníku vyteče, narazí přímo na filtr z výšky 620 mm, proteče jím a zachytí se pod filtrem do nádoby. Pokud filtr tuto zkoušku vydrží bez porušení, zvýší se teplota kovu a zkouška se opakuje. Porušení filtrů se projevuje nejprve tvorbou drobných trhlin, poté se tvoří celá síť trhlin především v místě nejvyššího ohybového momentu. Při ještě větším zatížení dochází k erozi filtru a k úplné destrukci. Je nutné mít dostatečný soubor naměřených dat pro vyhodnocení. Tato zkouška je stěžejní metodou pro zjištění mechanické a tepelné odolnosti.

### 3.3.2 TEPELNÁ KAPACITA FILTRU

Tepelná kapacita filtru je důležitá veličina. Při odlévání teplota filtru dosáhne teploty roztaveného kovu. Při vyšší hodnotě tepelné kapacity by mohlo dojít ke ztuhnutí proudu taveniny. Množství filtrem absorbovaného tepla lze vyjádřit vztahem  $Q_f = m_f \cdot c_f \cdot (t_k - t_0)$ . Kde:

- $m_f$  - hmotnost filtru
- $c_f$  - měrná tepelná kapacita
- $t_k$  - teplota kovu
- $t_0$  - počáteční teplota filtru

### 3.3.3 STANOVENÍ ODPORU FILTRŮ VE VTOKOVÉ SOUSTAVĚ

Filtr umístěný ve vtokové soustavě klade proudu kovu odpor a tím se prodlužuje doba lití odlitku. Odpor proti proudění je způsoben viskozitou kovu, třením a místními ztrátami při změně směru proudění. Protože je delší doba lití nežádoucí, je vhodné navýšit průtočnou plochu filtru. Pokud se porovná licí doba odlitku za použití filtru a bez použití filtru, tak podíl časů je míra vlivu odporu filtru na licí dobu. Pro zkoušku se používá šedá litina s teplotou lití  $1300\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$  resp.  $1350\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ . Vtoková jamka je uzavřena keramickou zátkou, do jamky se naleje kov z ruční pánve, která má obsah 50 kg, a po zaplnění jamky se zátka vyjme. Měří se čas od vyjmutí zátky po okamžik, kdy se naplní forma. Z dříve provedených experimentů vyplývá, že větší tloušťka filtru znamená i vyšší hydraulický odpor. Prodloužení doby lití za použití filtru není nijak výrazné. Změna licí teploty nemá vliv na dobu lití.

### 3.3.4 ÚČINNOST FILTRŮ Z HLEDISKA ZACHYCOVÁNÍ INKLUZÍ

Tato zkouška se provádí metodou tepelného rozkladu oxidů a nitridů ze vzorku slitiny v grafitovém kelímku v heliové atmosféře. Přístroj vyhodnotí množství uvolněného kyslíku a dusíku. Zkoušený vzorek je vývrt kovu v soustavě před filtrem a za filtrem.

Účinnost se vypočítá ze vztahu  $\eta_{O(N)} = \left(1 - \frac{O(N) \text{ za filtrem}}{O(N) \text{ před filtrem}}\right) \cdot 100 [\%]$

Vzhledem k tomu, že se jedná o složitou problematiku, nebývá provádění této zkoušky časté. [6]

## 4 TECHNOLOGIE PŘÍPRAVY KERAMICKÝCH SMĚSÍ

Za počátek výrobního procesu v keramice lze považovat zpracování natěžených vstupních surovin. Vstupní suroviny je potřeba nejprve upravit zdrobňováním, tj. drcením a mletím na požadovanou maximální velikost zrna. Následuje vhodný způsob homogenizace a zpracování složek pro dosažení vlastností výrobní směsi, definovaných způsobem vytváření. Těmito vlastnostmi se rozumí především vlhkost směsi a poměr plastických a neplastických surovin. Úprava surovin se většinou provádí mokřím způsobem, v některých případech lze využít suchý způsob úpravy. [7]

### 4.1 ZDROBŇOVÁNÍ KERAMICKÝCH SUROVIN

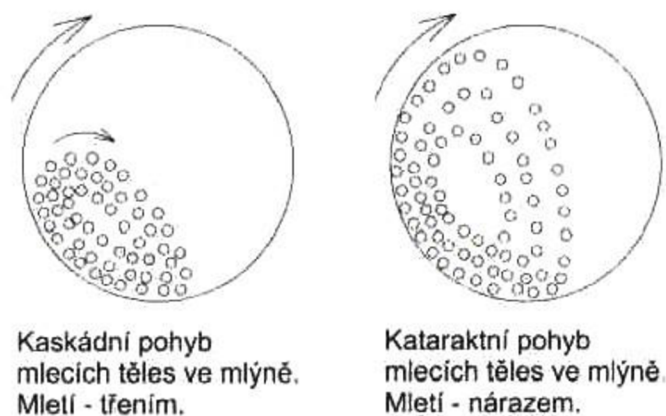
Jako proces zdrobňování se označuje drcení a mletí. Princip obou je stejný, rozdíl mezi drcením a mletím je ve výsledné velikosti zrna, ovšem neexistuje konkrétní hranice. Obvykle se jako hraniční velikost zrna udává 1 mm. Správná volba drtiče nebo mlýna závisí na vstupní a výstupní velikosti zrna, na tvrdosti materiálu a na tom, zda se zdrobňování provádí za sucha nebo za mokra. Pro zvýšení účinnosti mletí se používají intenzifikátory mletí, což jsou povrchově aktivní látky, které zabraňují aglomeraci částic. Mezi intenzifikátory mletí patří například voda. Při mokřím mletí dochází k většímu zdrobnění a lepší homogenizaci. Suroviny jsou do firmy Keramtech s.r.o. dodávány o takové velikosti zrna, že se upravují pouze mletím. Tento proces je popsán v kapitole 4.1.1 [8]

#### 4.1.1 MLETÍ KERAMICKÝCH SMĚSÍ

Nejčastěji používaným zařízením pro mletí výchozí směsi je kulový neboli bubnový mlýn. Existují periodické a kontinuální kulové mlýny. Pro mletí za mokra je vhodný

kaskádní režim otáček, pro suché mletí se využívá kataraktního režimu. Vzhledem k tomu, že v praxi se více využívá způsobu mokrého mletí a nejinak tomu je i ve firmě Keramtech s.r.o., následující text tedy přiblíží tento způsob mletí.

Kulový mlýn je tvořen ocelovým bubnem, vnitřní povrch bubnu může být z keramické vyzdívky, vyzdívky ze silicových kamenů, případně z otěruvzdorné pryže. Mlecími tělesy jsou koule nebo válečky nejčastěji z přírodního pázourku, korundové, alubitové nebo ocelové potažené pryží. Velikost mlecích těles lze určit z poměru měrných povrchů  $S_{\text{meliva}} > 5S_{\text{koulí}}$ . Náplň mlýna může obsahovat mlecí tělesa různých velikostí, přičemž menší mlecí tělesa zajišťují jemnější mletí. Optimální hmotnostní poměr melivo : mlecí tělesa : voda je 1 : 1 : 0,6 při celkové náplni mlýna do 80 %. Mlecí tělesa by měla zaujímat zhruba 50 % objemu mlýna. Mletí může probíhat ve dvou režimech. Kaskádní režim je charakteristický pro nižší otáčky nebo pro plnění mlýna do 30 %. Dochází k mletí třením meliva mezi vyzdívkou mlýna a mlecími tělesy. Kaskádní režim je vhodný pro jemné mletí. Pokud se otáčky mlýna přiblíží kritické hodnotě, nastává kataraktní režim mletí. Mlecí tělesa jsou působením odstředivé síly vynesena do určité výšky a poté vlivem gravitace padají. Uplatňuje se mletí nárazem. Tento režim je použitelný pro hrubé mletí.



Obr. 4.1: Kaskádní a kataraktní pohyb mlecích těles [9]

Pro přípravu koncentrované suspenze se přidává vhodné ztekutivno, které zvýší litrovou hmotnost. Takto upravená suspenze je určena pro sušení v rozprachové sušárně. Pro odvodnění v kalolisech není tato úprava suspenze vhodná. [9]

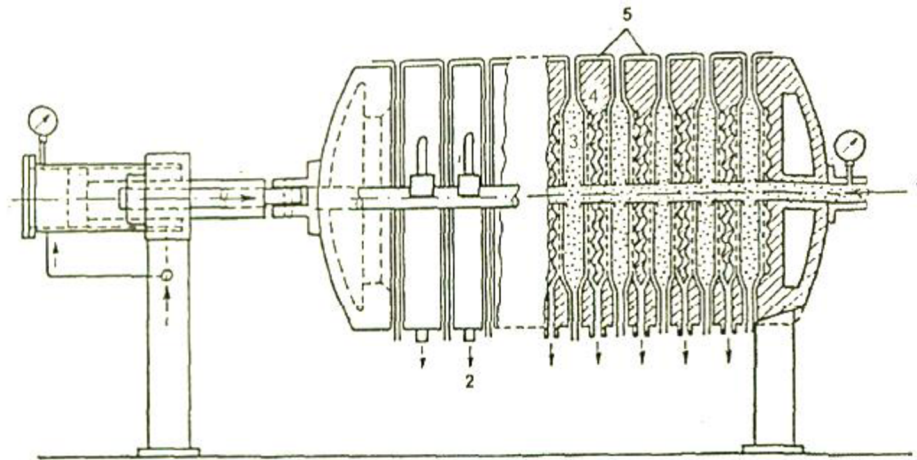
## 4.2 ODVODŇOVÁNÍ

V případě, že se keramická hmota vytváří za mokra, je nutné suspenzi odvodnit na určitý zbytek vody, vhodný pro vytváření konkrétním způsobem. Ještě před samotným odvodněním se suspenze vypouští z mlýna přes síto a magnetický separátor do rozplavovače, kam se mohou přidávat tzv. technologické odpady. Technologickým odpadem jsou zbytky směsi, které odpadají při tvarování nebo sušení, a jsou v polosuchém nebo v suchém stavu. V rozplavovači také probíhá konečná úprava reologie suspenze. Z rozplavovače se suspenze přepouští do míchače. Poté již následuje odvodnění. Při polosuchém a suchém zpracování se hmota odvodňuje tlakovou filtrací na vlhkost 20 až 25 % a dále se suší, v případě odvodnění rozprachovou sušárnou již není potřeba další úpravy vlhkosti. Odvodňování pracovní hmoty ve firmě Keramtech s.r.o. probíhá mechanicky v kalolisech. Granuláty pro suché lisování vznikají termickým odvodňováním v rozprachových sušárnách. [8] [10] [11]

### 4.2.1 KALOLISOVÁNÍ

Kalolisování je tlaková filtrace suspenze přes filtrační tkaninu a rostoucí vrstvu odvodněné hmoty. Komorový kalolis je tvořen kovovými nebo plastovými deskami se zesíleným okrajem. Tyto okraje tvoří při uzavření kalolisu komory. Desky jsou zavěšeny na dvou vodících tyčích, přičemž je deskám umožněn vodorovný posun. Ve středu desek je otvor, kterým se přivádí suspenze. Na deskách je upevněna bavlněná nebo syntetická filtrační tkanina s otvory v místě přívodu suspenze. Plocha desek je drážkovaná a mezi deskou a filtrační tkaninu se klade pozinkované síto zabraňující přitisknutí tkaniny do drážek. Běžné kalolisy mají 25 až 90 desek, zadní čelo je pevné, přední čelo se posouvá a uzavírá soustavu desek. Kalolis se uzavírá šroubovým vřetenem nebo hydraulickým válcem. Středovým otvorem, většinou přes zadní pevné čelo, se čerpadlem přivádí suspenze. Voda se vytlačuje přes tkaninu do drážek desky a spodem odtéká ven. Ukončení filtrace se projeví zvýšením tlaku na přívodním potrubí a tím, že přestane vytékat voda. Doba filtrace závisí na požadované tloušťce koláče a na míře odvodnění, pohybuje se od 20 minut do 5 hodin. Důležitá je také filtrovatelnost materiálu, kdy hrubší suspenze se filtrují snadněji než jemné. Po ukončení filtrace se vypne čerpadlo, otevře se kalolis a kalolisované koláče se vyjmou na vozík. Další dosoušení koláčů probíhá ve firmě Keramtech s.r.o. buď v sušárně, kde se koláče suší týden, nebo volně v prostoru výrobní haly, kde dosoušení trvá přibližně měsíc.

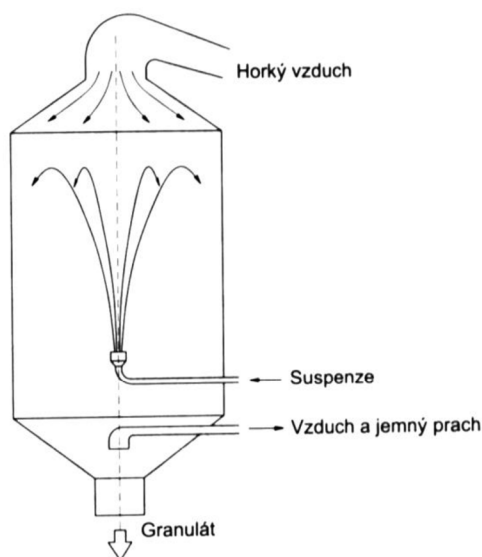
Vysušené koláče se pak melou v kolovém mlýně. Schéma kalolisu viz Obr. 4.2: Komorový kalolis. [11] [12]



Obr. 4.2: Komorový kalolis. 1-vstup kalu, 2-odtok vody, 3-kalolisované koláče, 4-desky kalolisu, 5-filtrační tkanina [12]

#### 4.2.2 ROZPRACHOVÉ SUŠENÍ

Rozprachová sušárna je ocelový válec, který se směrem dolů kónicky zužuje. Suspenze se zde zbavuje vody za současného granulování na částice o velikosti desetin milimetru. Suspenze může být rozprašována dvěma způsoby, a to tlakovým způsobem (tryskou) při maximálním tlaku 2 MPa, nebo rotujícím kotoučem (odstředivé rozprašování). Vzduch dosahuje teploty 500 až 800 °C a do sušárny je vháněn v souproudu nebo protiproudu se suspenzí. Suspenze se do sušárny vhání membránovým čerpadlem. Kapky suspenze v kontaktu s horkým vzduchem prudce vysychají, přitom se ale nepřehřejí nad teplotu 100 °C. Vzniklý produkt, tzv. granulát, jsou duté nebo pórovité kulovité částice o průměru 0,05 – 1 mm. Granulát padá ve spodní části sušárny na dopravní pás a je transportován do homogenizačních sil. Vlhkost granulátu bývá 2 – 6 %. Velikost částic lze regulovat tlakem suspenze a velikostí trysky, vlhkost ovlivníme dobou sušení. Pevnost granulí má být taková, aby nedošlo k jejich porušení při dávkování do formy, ale přitom se mohly deformovat vlivem lisovacího tlaku a vytvořit tak hutný výlisek. Pevnost lze upravit přidáním pojiv, např. parafínovou emulzí, roztokem methylcelulózy nebo polyvinylalkoholu. Polyetylglykol granule změkčuje. [10] [12] [13]



Obr. 4.3: Rozprachová sušárna [9]

#### 4.2.3 POROVNÁNÍ KALOLISOVÁNÍ A ROZPRACHOVÉHO SUŠENÍ

V současné době si firma Keramtech s.r.o. vyrábí všechny keramické hmoty sama mokrým mletím surovin a následným odvodněním suspenze pomocí kalolisů, přičemž vzniklé koláče se musí dále dosušet a poté namlet. To znamená dlouhý a technologicky náročnější proces, při kterém může dojít k chybám v dílčích procesech přípravy hmoty. Práce u kalolisů je fyzicky namáhavá, při mletí koláčů vzniká prach, který zhoršuje pracovní prostředí. Případné chyby v dílčích procesech se ovšem dají poměrně rychle odhalit pomocí zavedeného systému managementu kvality ISO 9001. Výhodou je výroba směsí podle osvědčených receptur, z těchto směsí jsou následně vyráběny výrobky s konstantními vlastnostmi. Další výhodou může být snadná úprava receptury pro možný další vývoj, případně pro specifickou individuální zakázku.

Granulát z rozprachové sušárny vykazuje konstantní zrnitost a rovnoměrnou vlhkost. Je bezprašný a má stálou sypnou hmotnost, což zajišťuje rovnoměrné zaplnění automatického lisovacího nástroje. Přináší zrychlení výroby a odstranění nepřilíš produktivního současného postupu přípravy hmoty. Jako nevýhoda se může jevit vyšší cena. Při nahrazení v současnosti používané hmoty granulátem se ale sníží časové a energetické náklady na výrobu hmoty, tudíž ve výsledku to lze považovat za výhodu. V začátku může být pro firmu náročnější nalézt na trhu takový granulát, ze kterého by se daly vyrábět výrobky srovnatelných vlastností a kvality, ovšem sortiment granulátů je široký a jistě lze najít vhodnou alternativu. [9]

## 5 TECHNOLOGIE VÝROBY KERAMICKÝCH FILTRŮ

V současné době ve firmě Keramtech s.r.o. probíhá výroba keramických filtrů přetokovým lisováním z vlhké směsi o vlhkosti 15 až 18 %. Lisování se uskutečňuje na hydraulických a mechanických lisech. Firma disponuje vlastním 3D konstrukčním pracovištěm a nástrojárnou. Snaha o zavedení suchého lisování z granulátu o vlhkosti 5 až 6 % je zejména z ekonomických důvodů. Po zavedení technologie suchého lisování by firma mohla rozšířit své působení na trhu.

### 5.1 MECHANISMUS ZHUTŇOVÁNÍ

Převedení zrnité keramické směsi v celistvý výlisek je možno charakterizovat konsolidačním průběhem, který se skládá ze tří stupňů zhutnění. V nultém stupni se jedná o volné nasypání směsi do formy, kdy nedochází k překonání tření mezi zrn. Podíl pórů je 70 až 85 %, velikost pórů řádově odpovídá velikosti zrn. Vedle těchto pórů se mohou vyskytovat ještě póry vytvořené v důsledku tzv. klenbového efektu můstků a oblouků mezi zrn. Při prvním stupni již probíhá lisování určitým tlakem. Nejdříve dojde ke zhroucení můstků, překonává se tření mezi zrn a ta zaujmají stabilní polohu. Současně nastává zhutňující mísení, mezery mezi velkými zrn se zaplňují malými zrn. V druhém stupni dochází již pouze k nepatrnému posunu zrn nebo ke změně jejich tvaru. Podle mezního napětí zrn můžou být zrna drcena nebo plasticky deformována. [14]

Důležité aspekty při lisování:

- zrnitost směsi – Vhodnou zrnitostí se dosáhne minimální mezerovitosti. Čím jemnější je směs, tím vyšší jsou třecí síly mezi zrn a zvyšuje se potřebný lisovací tlak.
- vlhkost směsi – Vlhkost snižuje odpor při lisování, snižuje se potřebný lisovací tlak. Výlisek by měl mít v celém objemu stejnou vlhkost.
- lisovací tlak – Velikost tlaku závisí na vlhkosti. Jeho účinek se projevuje zhutněním směsi. Stupeň zhutnění je charakterizován součinitelem stlačení  $K_s$ , což je poměr výšky vrstvy směsi ve formě k výšce výlisku. Většina závislostí mezi tlakem a vlastnostmi výlisků vychází z lisovacích zákonů, které jsou podrobněji rozepsány v kapitole 5.2

- odvzdušnění – Vzduch obsažený v dutinách a pórech při stlačení způsobuje vnitřní přetlak, to vede po uvolnění tlaku ke vzniku vlasových trhlin. Lisování tak probíhá v etapách předlisování, odvzdušnění, dolisování.
- lisovací zařízení – Pro vlhké směsi se používají mechanické lisy, které mají nižší lisovací sílu, jsou to např. lisy vačkové, klikové, kloubové. Pro suché směsi se používají lisy hydraulické, s jednostranným nebo oboustranným tlakem až 5000 kN. [7]

## 5.2 ZÁKONITOSTI LISOVÁNÍ

K posouzení účinnosti lisování je potřeba znát průběh zhutňování, účinek lisovacího tlaku na výšku, objem, pórovitost a hutnost vzniklé mikrostruktury. Tyto vztahy vyjadřují tzv. zákony lisování formulované Balšinem.

- Semilogaritmický zákon Walkerův-Balšinův

$$\log p = -k(\beta - 1) + \log p_{max}$$

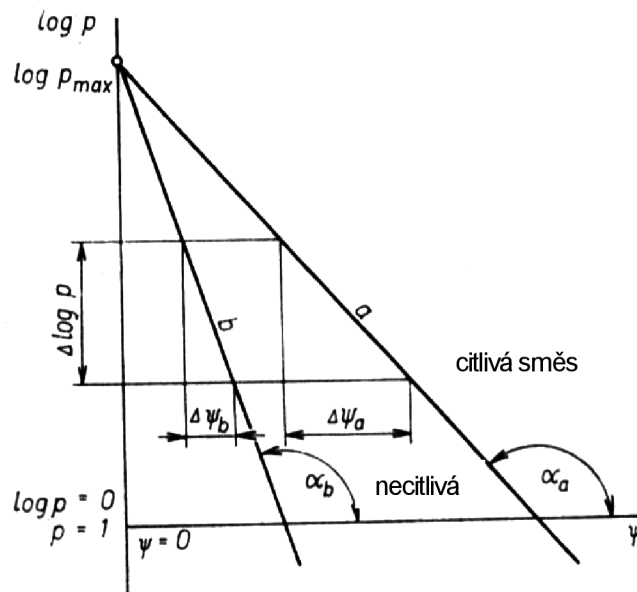
- Logaritmický zákon Balšinův

$$\log p = -m \log \beta + \log p_{max}$$

$k$ ,  $m$  jsou lisovací indexy. Čím nižší je jejich absolutní hodnota, tím je směs citlivější k lisování.  $p_{max}$  je tlak potřebný k vytvoření maximálně hutné směsi (bez pórů).  $\beta$  je poměr celkového objemu k objemu tuhé fáze výlisku.  $\beta - 1$  je součinitel pórovitosti.

Směs citlivá k lisování je taková směs, u které malá změna tlaku vyvolá velké zhutnění. Zároveň ale malá změna tlaku např. třením o stěnu formy způsobí rozdílnou pórovitost a tím nestejněměrné prolisování. Pokud je směs necitlivá, malé rozdíly tlaku způsobují pouze nepatrné rozdíly v pórovitosti.





Obr. 5.1: citlivost směsí k lisování [11]

Na výše uvedené lisovací zákony navazují následující lisovací rovnice.

- rovnice Berežného (k I. zákonu)  

$$PS = a - b \cdot \log p$$
- rovnice Kazakievičova (k II. zákonu)  

$$K_s = C \cdot p^n$$

Tabulka 5.1 ukazuje vliv vlhkosti na konstanty  $a$ ,  $b$  pro rovnici Berežného, konstanty  $c$ ,  $n$  pro rovnici Kazakievičovu.

Tabulka 5.1: Vliv vlhkosti na lisovací konstanty

vlhkost [%]	$PS = a - b \cdot \log p$	$K_s = C \cdot p^n$
4,0	$44,1 - 8,15 \cdot \log p$	$1,38 \cdot p^{0,0624}$
5,0	$39,6 - 6,94 \cdot \log p$	$1,44 \cdot p^{0,0581}$
5,8	$33,6 - 5,00 \cdot \log p$	$1,63 \cdot p^{0,0397}$
7,5	$23,3 - 0,54 \cdot \log p$	$1,86 \cdot p^{0,0142}$
8,7	$25,6 - 0,54 \cdot \log p$	$1,94 \cdot p^{0,0042}$

U Berežného rovnice je konstanta  $a$  materiálová, má souvislost se sypanou hmotností směsi. Konstanta  $b$  souvisí s vlhkostí, tzn. také s odporem směsi při lisování. Pokud stoupá vlhkost, slabě klesá konstanta  $a$  (snižuje se objem násypu), výrazně klesá konstanta  $b$  (snížení tření mezi zrny). Pórovitost lineárně klesá s logaritmem tlaku. U Kazakievičovy rovnice se s rostoucí vlhkostí zvětšuje konstanta  $C$ , konstanta  $n$  se

zmenšuje. Konstanta  $n$  souvisí s efektivním poklesem tlaku vlivem vlhkosti, konstanta  $C$  souvisí s růstem koeficientu stlačení při vzrůstající vlhkosti. [7] [15]

### 5.3 LISOVÁNÍ Z VLHKÉ SMĚSI

Vlhká lisovací hmota, tzv. drolenka má vlhkost 15 až 20 %, snadněji se zpracovává a pro lisování stačí menší tlaky do 30 MPa. Hmota má plastické vlastnosti, je charakteristická mezí toku. Po překročení meze toku se chová jako nestlačitelná newtonovská kapalina a tlak se v ní šíří všemi směry. Vlhké lisování může být pístové a přetokové a vyhovuje mu semilogaritmický zákon Walkerův-Balšínův. Výška výlisku je stejná jako hloubka formy. Forma se plní přebytkem hmoty, přičemž se uplatňuje výše zmíněný mechanismus zhutňování. V první fázi se tlak zvyšuje zvolna, dochází k vytlačení vzduchu a těstovitá hmota zaplňuje celý prostor formy. V konečné fázi se tlak zvyšuje velmi prudce až do fáze dosažení meze toku lisovaného materiálu. Nesmí ovšem dosahovat takových hodnot, při kterých by se vytlačovala voda z hmoty. Přebytek hmoty se odstraňuje zmenšující se mezerou mezi formou a lisovníkem a odpadovými otvory, které mohou být jak ve spodní části formy, tak i v lisovníku. Lisování končí dosednutím lisovníku na formu. Výlisek musí mít takovou vlhkost, aby měl dostatečnou mechanickou pevnost důležitou pro manipulaci. Množství vlhčidla ovlivňuje mez toku lisovací hmoty, při maximálním tlaku se na povrch vytlačí olej, který usnadňuje sejmutí výlisku z nástroje. Jako vlhčidlo se používá voda a lisovací olej, což je směs uhlovodíků (alkany) a mazadla (olein). [10] [11] [15]

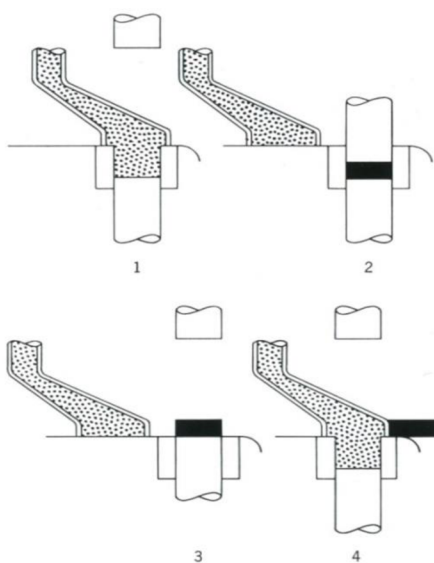
### 5.4 SUCHÉ LISOVÁNÍ

Suché lisování je zhutňování suchého nebo mírně vlhkého granulátu v kovové matici za dostatečně vysokých tlaků, které vytváří hutný výlisek. Jedná se o formovací metodu, která se značně používá pro žáruvzdorné materiály, dlaždice, speciální elektrickou a magnetickou keramiku, izolátory zapalovacích svíček a další technickou keramiku. Existují dvě varianty suchého lisování, jednoosé a izostatické. V případě jednoosého lisování působí lisovací síla jednostranně nebo dvoustranně proti sobě. Tento způsob je vhodný pro výlisky s poměrem výšky k průměru menší než 1. Při izostatickém lisování působí tlak všesměrně, je umožněno lisování složitějších tvarů a výlisky se mohou v suchém stavu obrábět. Nespornou výhodou suchého lisování jsou přesné rozměry výrobků, úspora energie při sušení a možnost automatizace výroby. Nevýhodou je

nerovnoměrné rozložení tlaku ve výlisku, které je mimo jiné značně ovlivněno výškou výlisku nebo třením o stěny formy. [16] [17]

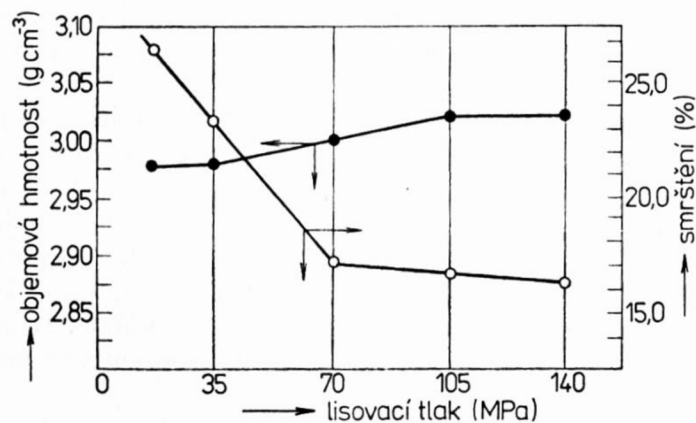
Granulát vhodný pro výrobu za sucha lisovaných výrobků je vlhčen lisovacími přísadami v množství 1 až 10 %. Je možné přidávat vodu a organické látky, jimiž jsou lisovací oleje, kyselina olejová, parafiny, petrolej, n-alkany, a další. V procesu přípravy granulátu v rozprachové sušárně se do suspenze přidává např. polyvinylalkohol (PVA), metylcelulóza, které zajistí vyšší mechanickou pevnost výlisku. Polyetylglykol (PEG) se přidává za účelem změkčení granulí. Granulát by neměl obsahovat prachovou složku, ta má za následek zabránění odvodu vzduchu při lisování a zabránění zatékání granulátu do nástroje.

Základní kroky v automatickém lisování za sucha jsou znázorněny na Obr. 5.2. V kroku 1 spodní razník spadne do polohy pro naplnění a zásobník dodává do dutiny formy rovnoměrný objem materiálu. Během kroku 2 probíhá lisování. U mechanických lisů se dosáhne konstantní hloubky lisování, u hydraulických lisů je dosažen pevný tlak. Výsledný objem výlisku je obvykle přibližně polovina objemu volně nasypaného materiálu. Během kroku 3 spodní razník vytlačí výlisk nahoru. V kroku 4 se zásobník opět posune nad formu a tím odsune právě vylisovaný kus. Krok 4 je tedy zároveň opět krokem 1. Jedná se o relativně jednoduchou operaci pro jednoduché tvary. Složitější tvary však vyžadují lisovací pohyby speciálně navržené tak, aby dosáhly jednotné hustoty.



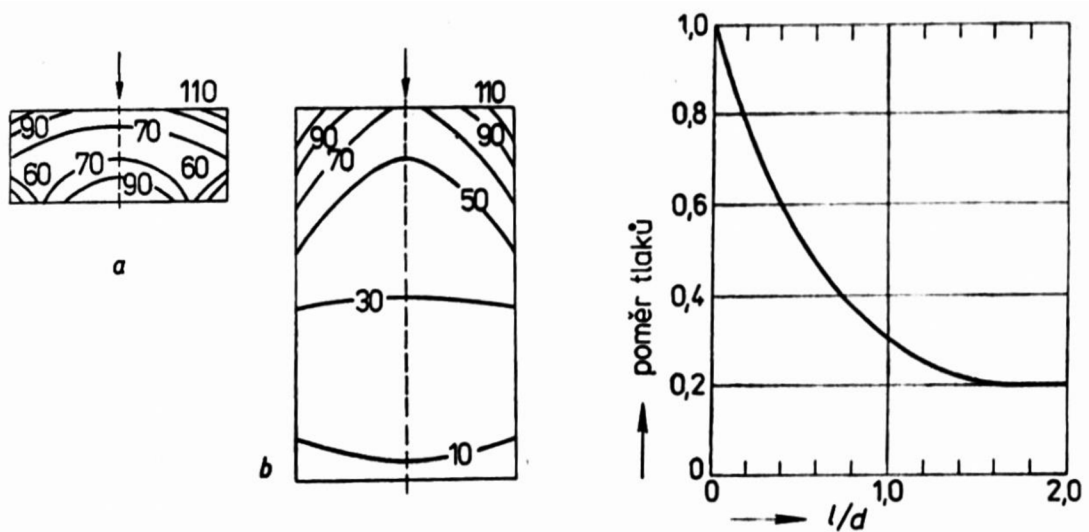
Obr. 5.2: základní kroky automatického suchého lisování [16]

Vliv lisovacího tlaku na zhutňování granulátu v lisovaných výrobcích je znázorněn na Obr. 5.3. Až do hodnoty 70 MPa smrštění při výpalu prudce klesá. V této oblasti dochází ke zhutňování a tím k nárůstu objemové hmotnosti. Nad tímto tlakem již není možné zhutňování vlivem přeskupování zrn. Mírné zvýšení objemové hmotnosti nad tlakem 70 MPa se děje vlivem plastické deformace zrn nebo drcením zrn v místech dotyku. V důsledku tohoto jevu poté lépe probíhá slinování a tím po výpalu objemová hmotnost vzroste. Tato znázorněná závislost byla experimentálně provedena při slinování BeO.



Obr. 5.3: Vliv lisovacího tlaku na objemovou hmotnost a na smrštění [16]

Při lisování ze suchých směsí se nedosáhne rovnoměrného rozložení tlaku v celém objemu vylisku. U razníku je vždy tlak vyšší než v hlubších vrstvách materiálu vlivem tření o stěny formy. Rozložení tlaků závisí na poměru výšky a průměru vylisku. Toto vidíme na Obr. 5.4. Keramické filtry bezproblému dosahují poměru výšky k průměru menší než 1, proto se zde uplatňuje rozložení tlaku podle modelu a na Obr. 5.4. [16]



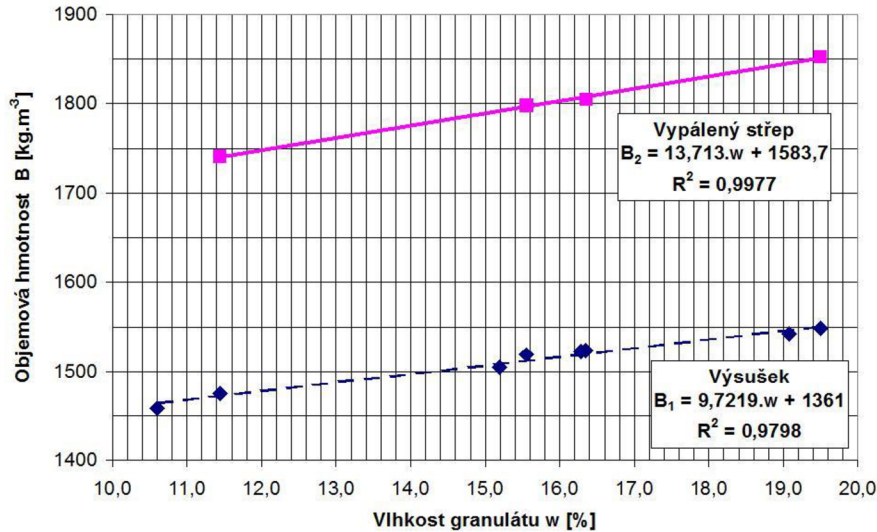
Obr. 5.4: Linie stejného tlaku v % a poměr tlaků v závislosti k poměru výšky k průměru vylisku [13]

## 5.5 POROVNÁNÍ VLHKÉHO A SUCHÉHO LISOVÁNÍ

Pro přetokové (vlhké) lisování se používá směs o vlhkosti 15 – 21 %, zatímco pro suché lisování postačí vlhkost do 10 %. Porovnání přípravy směsí byla věnována kapitola 4.2.3. Dávkování směsi do formy je při přetokovém lisování v přebytku a proto nemusí být přesné. U suchého lisování dávku určuje objem formy, případně se směs dávkuje hmotnostně. Pro vytváření z vlhké směsi stačí lisovací tlak do 30 MPa. Při suchém lisování dosahuje tlak až 100 MPa, přičemž je vhodné, aby síla působila obousměrně proti sobě. Ještě před tím, než budou výlisky vypáleny, musí mít zbytkovou vlhkost max. 2 %. U výlisků vytvořených suchým lisováním s touto hodnotou nebývá problém, výlisky z vlhké směsi se ovšem musí před výpalem sušit. To prodlužuje dobu výroby a zvyšuje energetickou náročnost. Navíc se keramické filtry vyráběné touto metodou musí v suchém stavu ručně dočišťovat, což opět prodlužuje dobu výroby a je k tomu potřebná lidská pracovní síla. Vlhké lisování omezuje tloušťku keramických filtrů na minimální rozměr větší než 6,5 mm, filtry menších tlouštěk nejdou snadno odebrat z nástroje. Z ekonomického hlediska je výhodnější suché lisování. Vstupní náklady na lisovací zařízení jsou sice vyšší, sníží se ale náklady na energie a na mzdy pracovníků.

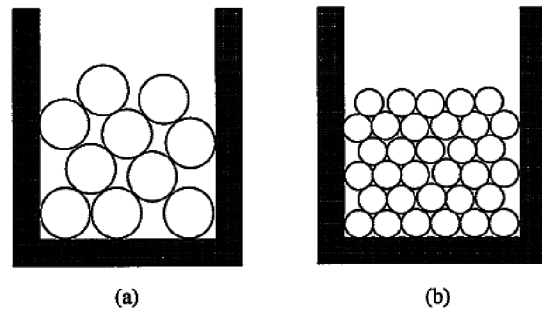
## 5.6 VLIV RŮZNÝCH ASPEKTŮ NA KVALITU ZA SUCHA LISOVANÝCH VÝROBKŮ

Experiment [18] zaměřený na vliv vlhkosti granulátu pro výrobu za sucha lisovaných obkladových prvků na vlastnosti vypáleného střepu ukázal, že vlhkost je zásadní proměnná ovlivňující konečné vlastnosti střepu. Pracovalo se s vlhkostí granulátu 10,6 % - 19,5 %. Se zvyšující se vlhkostí se zvyšovala i objemová hmotnost výsušku a při výpalu docházelo k dalšímu zvýšení objemové hmotnosti díky vhodným podmínkám ke slinování. Zároveň klesala nasákavost a pórovitost, tudíž se zvyšovala hutnost výsušku i vypáleného keramického střepu. Závislost vlhkosti na objemové hmotnosti je lineární a můžeme ji vidět na Obr. 5.5.



Obr. 5.5: Vliv vlhkosti na objemovou hmotnost výsušku a vypáleného střepu [18]

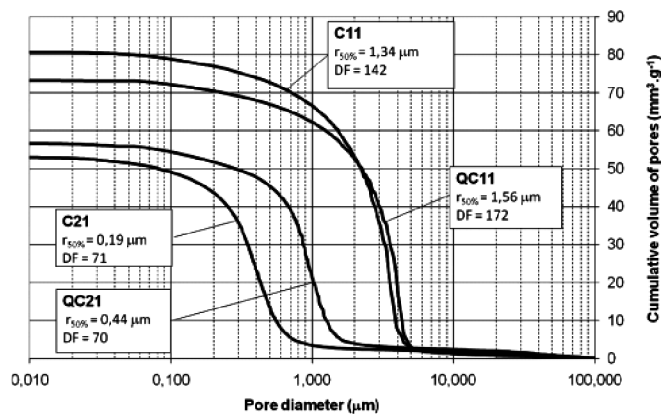
Studie [19] sledovala vliv průměru matrice a poměru stran na hustotu plnění a objemovou hmotnost výlisku z 94% hliníkového granulátu. Zjistilo se, že jak průměr matrice, tak poměr stran výrazně ovlivňují počáteční objemovou hmotnost volně naspaného granulátu i vylisovaného kompaktu (experiment byl prováděn při lisovacím tlaku 120 MPa). Obecně platí, že objemová hmotnost je menší u menších nástrojů a nižších poměrů stran. Také poměr velikosti granulí a formy je zásadní. Názorně to lze vidět na Obr. 5.6.



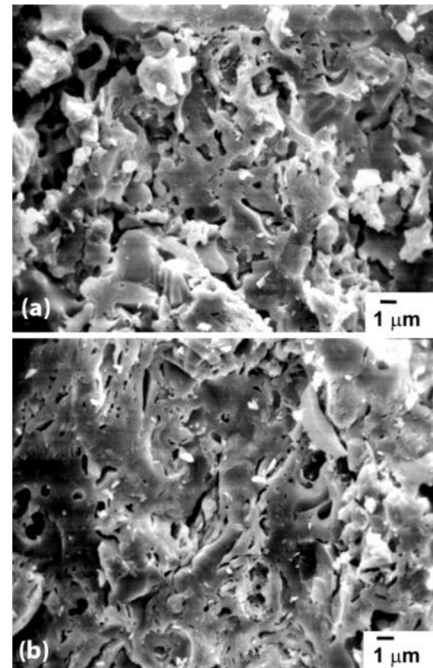
Obr. 5.6: Vliv poměru velikosti granulí a velikosti matrice. Všimněme si, že když se velikost granulí stane velkou vzhledem k velikosti matrice, efektivita zaplnění se snižuje. Naopak efektivita zaplnění se zvyšuje s menším poměrem velikosti granulí a matrice. [19]

V jiném výzkumu [20] byly posuzovány vlastnosti vypálených keramických střepů v závislosti na typu použitého jílu (jíl B1 a jíl 1574, liší se poměrem plastické a neplastické složky), způsobu vytváření (plastické těsto a suché lisování) a teplotě výpalu. Z výzkumu je mimo jiné patrné, že střep z plastického těsta dosahuje nižší pórovitosti, tj. i nižší nasákavosti a zdánlivé pórovitosti, a logicky vyšší objemové hmotnosti, než střep vytvořený suchým lisováním. Tyto hodnoty mají vliv i na pevnost v ohybu, kdy střep z plastického těsta dosahuje vyšších pevností. Možnou příčinou těchto výsledků je vyšší objemová hmotnost výsušků připravených z plastického těsta. Dále je u střepu lisovaného za sucha vidět, že rozdíl mezi výsledky nasákavosti za

studena a nasákavosti vakuové je někde i 50 %, přičemž u vakuové metody byly hodnoty nasákavosti vždy vyšší. Rozdílné výsledky nasákavostí jsou dány tím, že každá z metod dokáže zaplnit póry pouze do určité velikosti. Při vytváření suchým lisováním dosahuje vyšší hutnosti střep na bázi jílu 1574 oproti jílu B1. V Obr. 5.7 vidíme distribuci velikosti pórů. Vidíme tedy, že střep vytvořený suchým lisováním má výrazně vyšší objem pórů a vyšší medián poloměru pórů  $r_{50\%}$ . Pórovitější struktura střepu vyrobeného suchým lisováním je patrná i na snímku z mikroskopu. (Obr. 5.8)



Obr. 5.7: Distribuce velikosti pórů střepů, vlivu typu jílu a způsobu vytváření. Křivky C11 a QC11 platí pro střepy vytvořené suchým lisováním, křivky C21 a QC21 pro střepy vytvořené z plastického těsta. [20]



Obr. 5.8: Mikrostruktura vypálených střepů. a) střep vytvořený suchým lisováním, b) střep vytvořený z plastického těsta [20]

V roce 2013 probíhal na univerzitě v Brazílii podobný výzkum jako [20], který porovnával dva způsoby vytváření porcelánových obkladových prvků, a to suchým lisováním a odléváním pásu. Z experimentu vyšlo najevo, že mikrostruktura výsušků vytvořených odléváním je více homogenní, zatímco ve výsušcích vytvořených suchým lisováním se vyskytují i intergranulární póry. Vyšší mechanickou sílu vykazoval střep vytvořený odléváním. Vzhledem k tomu, že charakteristiky procesu, jako je chemické složení, distribuce velikosti částic, objemová hmotnost, maximální teplota výpalu, byly stejné pro oba formovací procesy, lze konstatovat, že rozdíl v mechanické pevnosti je opravdu dán způsobem vytváření. [21]

Ašmarin a kol. zkoumal vliv objemu pórů na pevnostní charakteristiky keramiky. Jednotlivé póry se liší formou, rozměry, orientací a křivostí povrchu. Rtuťovou porozimetrií byla provedena analýza objemu pórů. V největším zastoupení byly ve zkoumaných vzorcích póry menší než 10  $\mu\text{m}$ . Z provedeného experimentu vyplývá, že na pevnostní charakteristiky má daleko větší vliv délka trhlin, nikoli tyto póry. Trhliny byly posuzovány RTG metodou počítačové tomografie. [22] Nutno ovšem podotknout, že tento výzkum byl zaměřený na cihlářskou keramiku.

## 6 SUŠENÍ

Sušení je technologický proces, při kterém se snižuje vlhkost vylisku na takovou hodnotu, která je určena technologií výpalu. Protože sušení probíhá působením tepla, je tento proces energeticky náročný. S výhodou se tu ovšem využívá tepelného obsahu vzduchu z chladicího pásma pece. Principem sušení je vlivem působení tepla přeměnit vodu v páru, která je odváděna vlhkým vzduchem. Při stávající výrobě keramických filtrů z vlhké směsi má sušení velký význam, oproti tomu při výrobě suchým lisováním není sušení tolik podstatné. V současnosti se vylisované filtry suší v kontinuálních sušárnách, určité typy výrobků se suší i v komorových sušárnách. Sušení v kontinuálních sušárnách je jednovrstvé rychlé sušení. Vylisky jsou skládány v jedné vrstvě na dopravní pás, který se pohybuje sušárnou. V jednotlivých úsecích sušárny proudí vzduch o určitých parametrech, daných režimem sušení. Sušárenský prostor komorové sušárny se periodicky zavází a vyváží vylisky, vzduch proudí komorou za pomoci axiálních ventilátorů. Vylisky se suší na zbytkovou vlhkost 2 %.

## 7 VÝPAL

Při výpalu probíhají ve střepu fyzikální i chemické procesy, vylisek získává nové strukturní uspořádání a tím i své charakteristické vlastnosti, jakými jsou např. pevnost, hutnost, chemická odolnost, tepelné vlastnosti. Výpal je energeticky velmi náročný proces, spotřebuje se při něm až 50 % veškeré vynaložené energie. Režim výpalu je závislost teploty na čase, což se znázorňuje vypalovací křivkou. Dalšími důležitými parametry může být pecní atmosféra nebo tlakové poměry v peci. Režim výpalu lze rozdělit na tři etapy. První etapa je náběh na maximální teplotu, poté následuje výdrž na této teplotě. Doba výdrže se liší podle typu výrobků a je potřebná pro získání konečných vlastností. Poslední etapou je chlazení. Je to nejnebezpečnější etapa, při které může



snadno docházet ke vzniku trhlin v důsledku pnutí. Nebezpečím jsou také modifikační přeměny krystalických fází. V keramice obsahující volné  $\text{SiO}_2$  se nejčastěji jedná o přeměnu  $\alpha$ -křemene na  $\beta$ -křemen při teplotě  $573\text{ }^\circ\text{C}$  doprovázenou objemovými změnami. V oblasti těchto přeměn je nutné pomalé chlazení. Optimální vypalovací křivka se stanovuje experimentálně na základě zkoušek. Nejdůležitější zkoušky jsou smrštění pálením, změny ve střepu při výpalu (DTA, RTG). [23]

Keramické filtry se vypalují na teplotu v rozmezí  $1285 - 1390\text{ }^\circ\text{C}$  dle typu hmoty. K dispozici je jedna kontinuální tunelová pec. Pálené zboží je uloženo na pecních vozech v několika etážích za pomoci pecních pomůcek. Takto zaplněné vozy projíždějí pecí v podobě vlaku. Rychlost posunu je po celé délce pece konstantní. Jako palivo se zde používá zemní plyn. Další tři pece jsou periodické, komorové. Výrobky se do nich zavážejí na pecních vozech, uzavírají se samostatnými vraty. Vytápí se také pomocí zemního plynu. Výhodou tohoto typu pece je možnost manipulace s výrobky mimo pecní prostor. Čerstvě vypálené horké výrobky se vyvezou z pece a ihned se do horké pece může zavést další slož. Tímto se omezí ztráty tepla. Další výhodou periodických pecí oproti tunelové je možnost výpalu různých hmot s různými vypalovacími křivkami. Tunelová pec má režim výpalu nastavený pouze pro výrobky z hmot Pyrostat a Pyral.

## 8 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem experimentální části je okomentovat průběh vytváření vzorků z různých směsí, zhodnotit vliv vlhkosti směsi na fyzikálně-mechanické vlastnosti výsušků a vypálených vzorků, vliv různých režimů výpalu na fyzikálně-mechanické vlastnosti vypáleného keramického střepu. Na základě zjištěných výsledků navrhnout vhodnou směs, optimální lisovací vlhkost a optimální režim výpalu pro možnost výroby keramických filtrů suchým lisováním.

### 8.1 POUŽITÉ SUROVINY

Pro výrobu zkušebních vzorků byly použity čtyři granuláty. Dva granuláty byly od firmy Quarzsandwerke Weissenbrunn (QSW) nesoucí označení H 1033/17 a/2 (typ C 511) a H 1033/11 B 12 (typ C 511). Další dva byly od firmy IMERYS Tableware s.r.o., konkrétně CP820M (typ C 520) a CP823M (typ C 511). Chemické složení všech granulátů je zobrazeno v následující tabulce. Jako vlhčivo se ve všech případech používal olein.

**Tabulka 8.1: Chemické složení použitých granulátů [TL] a hmoty Pyrostat**

hmota	CP823M	CP820M	H1033/11B12	H1033/17a/2	Pyrostat
typ dle ČSN EN 60672	C511	C520	C511	C511	C510
oxid	množství [%]				
SiO <sub>2</sub>	56,6	43,7	58,8	57,3	52 – 57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,8	38,1	32,5	31,6	36 – 41
MgO	6,5	12,7	3,5	5,3	0,3 – 0,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	2,5	2,0	2,3	2,3 – 3,3
K <sub>2</sub> O	0,9	0,9	1,3	1,7	0,7 – 1,2
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,1	0,2	0,3	max. 0,3
CaO	0,4	0,3	0,3	0,5	max. 0,6
TiO <sub>2</sub>	1,4	1,7	1,3	1,1	1,2 – 1,6
BaO	-	-	-	0,1	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,3	-	-	-	-
ZŽ	6,6	8,7	5,5	7	6 – 7,5

## 8.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Všechny granuláty se vlhčily na dvě vlhkosti, a to 3,5 % a 6 %. Pro přípravu směsí se navážilo vždy 1500 g granulátu a vsypalo se do laboratorní míchačky. Kontrolně se stanovila počáteční vlhkost granulátu na analyzátoru vlhkosti a poté se navážilo určené množství vlhčiva (oleinu). Experimentálně byly zjištěny objemy oleinu jak pro vlhkost 3,5 % tak pro vlhkost 6 %. Laboratorní míchačka se uvedla do chodu, během míchání se přidal olein a míchalo se po dobu 1 min. Směs se z míchačky přesypala do plastové nádoby a překryla se igelitem, aby neztrácela vlhkost. Takto se postupovalo při vlhčení všech směsí.

Výroba zkušebních vzorků by měla být co nejvíce podobná výrobě výrobků. Průměr vzorků po výpalu má dosahovat hodnot  $45 \pm 0,7$  mm, výška pak  $3 \pm 15$  mm. Počet kruhových otvorů v tělísku je 208, jejich průměr je  $1,8 \pm 0,15$  mm po výpalu. Zkušební tělíska byla vytvářena na automatickém lisu, jehož lisovací tlak je 25 MPa. Princip průběhu lisování byl popsán v kapitole 5.4. Na sadě nevypálených vzorků se stanovila objemová hmotnost a síla potřebná ke zlomení.



Obr. 8.1: Vylisovaná zkušební tělíska

Výpal zkušebních vzorků probíhal v provozních podmínkách. Vzorky byly vypáleny na pět různých režimů výpalu při teplotách 1275 °C, 1310 °C, 1320 °C, 1345 °C, 1375 °C. Skutečná teplota při výpalu byla určena tzv. identifikátory teploty, kroužky PCTR (Process Temperature Control Rings). Tyto kroužky se při výpalu smrští, jejich průměr se poté změří mikrometrem a z tabulky se odečte ekvivalentní teplota výpalu. Byl použit typ ST (rozsah měření 1130 – 1400 °C), velikosti H (průměr 20 mm, výška 7 mm). [24] Na vypálených vzorcích se určily rozměry a hmotnost, stanovila se objemová hmotnost, zdánlivá hustota, nasákavost, zdánlivá pórovitost a síla potřebná ke zlomení. Postup zkoušek bude popsán v následujících kapitolách.

### 8.3 STANOVENÍ SKUTEČNÝCH ROZMĚRŮ

Před stanovením skutečných rozměrů je nutné odstranit případné výčnělky. Základní rozměry (d, h) se měří posuvným měřítkem vždy dvakrát, průměr otvorů se stanovuje kalibrem. Prohnutí výrobků se měří digitálním úchylkoměrem.

### 8.4 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ ZKOUŠKY NA ZKUŠEBNÍCH VZORCÍCH

- objemová hmotnost

Objemová hmotnost udává hmotnost objemové jednotky vysušeného vzorku včetně všech pórů. Vyjadřuje se v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Stanovuje se z hmotnosti a skutečných rozměrů dle vztahu:

$$OH = \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{\frac{v \cdot \pi}{4} \cdot (d^2 - 208 \cdot d_{ot}^2)} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$\rho_H$ ...objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  
 $m_s$ ...hmotnost suchého vzorku [kg]  
 $V$ ...objem vzorku [ $\text{m}^3$ ]  
 $v$ ...výška vzorku [m]  
 $d$ ...průměr vzorku [m]  
 $d_{ot}$ ...průměr otvoru [m]  
 $208$ ...počet otvorů ve vzorku

- nasákavost

Nasákavost udává schopnost keramického střeptu přijímat kapalinu. Při této zkoušce se vyplní vodou otevřené póry, charakterizuje tak pórovou strukturu střeptu. Platí, že čím vyšší je nasákavost, tím vyšší je i pórovitost. Vyjadřuje se v % a je to poměr hmotnosti vody nasáklé ve vzorku k hmotnosti vysušeného vzorku. Stanovuje se několika způsoby, a to při atmosférickém tlaku, varem a vakuovou metodou. V této práci je nasákavost stanovena vakuovou metodou. [25] Vzorec pro výpočet nasákavosti:

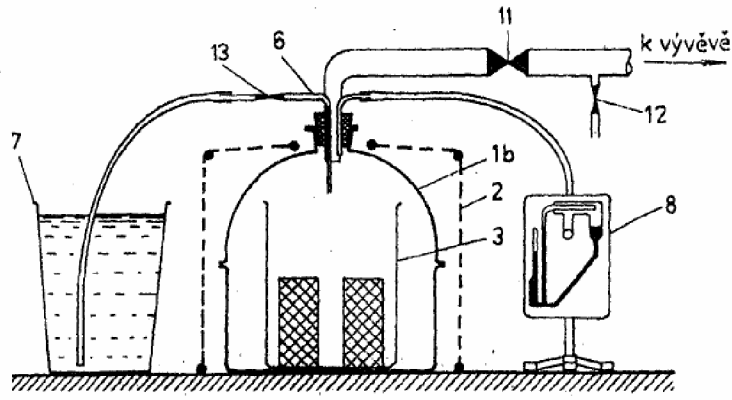
$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 [\%]$$

$NV$ ...nasákavost [%]

$m_n$ ...hmotnost nasáklého vzorku [g]

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

Při stanovení nasákavosti vakuovou metodou jsou vysušené zvážené vzorky umístěny bez vzájemného dotyku do exsikátoru, ze kterého se odčerpá vzduch po dosažení tlaku 80 kPa. Vakuum se udržuje 15 minut, poté se do exsikátoru napustí voda do poloviny výšky vzorků. Po dalších 15 minutách se doplní voda tak, aby zcela zaplavila vzorky. Vakuum se zruší a exsikátor se otevře. Vzorky jsou postupně vyjímány z vody a po otření vlhkou tkaninou se váží.



Obr. 8.2: Princip stanovení nasákavosti vakuovou metodou. 1b-vakuový exsikátor, 2-ochranná síť proti účinkům imploze, 3-nádoba se zkušebními vzorky, 6-trubice k napouštění vody, 7-nádoba s vodou, 8-kompresní vakuoměr, 11-uzávěr čerpacího zařízení, 12-zavzdušňovací ventil vývěvy, 13-uzávěr přívodu vody [26]

- zdánlivá pórovitost

Zdánlivá pórovitost udává poměr objemu otevřených pórů k celkovému objemu vzorku včetně pórů. Je to objektivnější ukazatel pórovitosti než nasákavost, protože výsledky pórovitosti nejsou ovlivňovány hustotou střeptu jako při nasákavosti. [27]

$$PZ = \frac{m_n - m_s}{m_n - m_{nv}} \cdot 100 [\%]$$

$PZ$ ...zdánlivá pórovitost [%]

$m_n$ ...hmotnost nasáklého vzorku [g]

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

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



Obr. 8.3: Hydrostatické vážení

- zdánlivá hustota

Zdánlivá hustota je hmotnost vysušeného vzorku dělená jeho objemem včetně uzavřených pórů. Pokud vzorek nemá uzavřené póry, zdánlivá hustota se rovná měrné hmotnosti. vyjadřuje se v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a vypočítá se podle vzorce: [27]

$$ZH = \frac{m_s}{m_s - m_{nv}} \cdot 1000 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

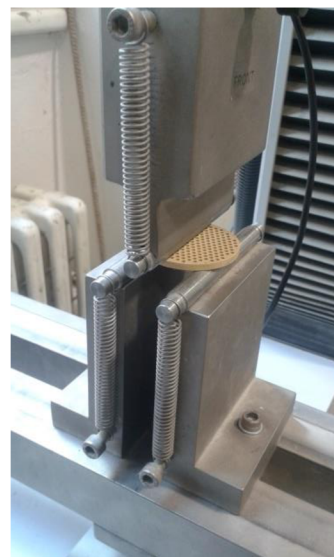
ZH...zdánlivá hustota [kg·m<sup>-3</sup>]

m<sub>s</sub>...hmotnost vysušeného vzorku [g]

m<sub>nv</sub>...hmotnost vzorku váženého hydrostaticky [g]

- síla potřebná ke zlomení

Vzhledem k tomu, že zkušební vzorky mají složitý průřez (otvory), je komplikované stanovit přesně pevnost v ohybu. Z toho důvodu postačí znát maximální sílu při porušení zkušebního vzorku. Ke stanovení síly se používá nástroj na třibodový ohyb.



Obr. 8.4: Zařízení pro stanovení síly potřebné ke zlomení

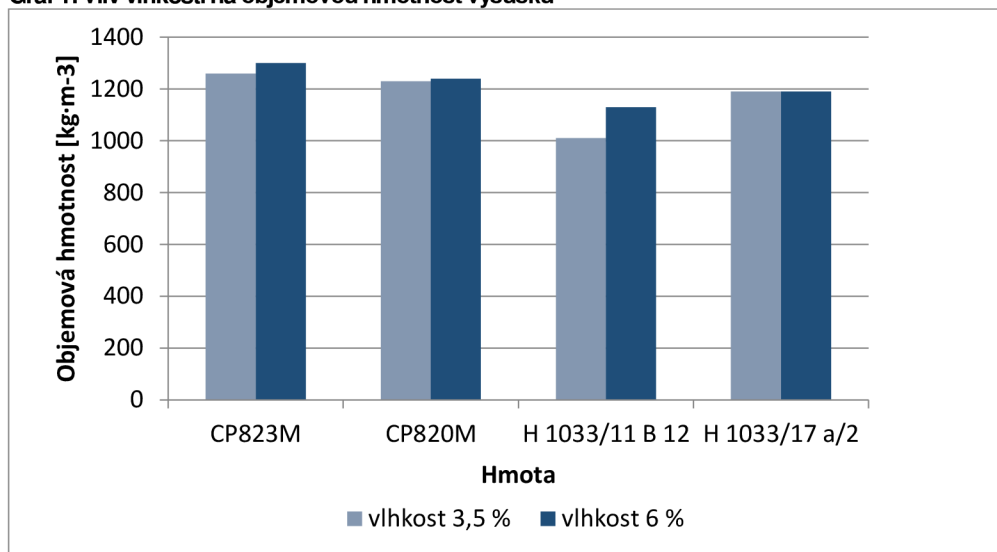
## 8.5 VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na vzorcích byly provedeny zkoušky, které jsou popsány v kap. 8.4, tedy objemová hmotnost, zdánlivá hustota, nasákavost, zdánlivá pórovitost a síla potřebná ke zlomení. Výsledky zkoušek na výsušcích byly zaneseny do tabulky 8.2 a do grafů níže, vlastnosti vypálených střepeň byly zaznamenány do tabulek a grafů, které jsou součástí přílohy.

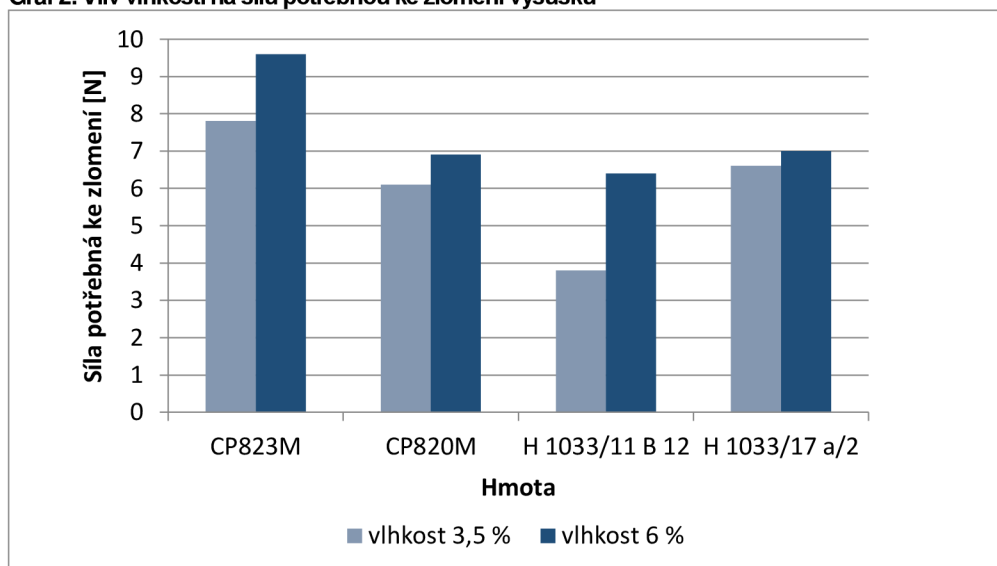
Tabulka 8.2: Vlastnosti výsušků

hmota	vlhkost	OH [kg·m <sup>-3</sup> ]	F [N]
CP823M	3,5 %	1260	7,8
	6 %	1300	9,6
CP820M	3,5 %	1230	6,1
	6 %	1240	6,9
H 1033/11 B 12	3,5 %	1010	3,8
	6 %	1130	6,4
H 1033/17 a/2	3,5 %	1190	6,6
	6 %	1190	7,0

Graf 1: Vliv vlhkosti na objemovou hmotnost výsušků



Graf 2: Vliv vlhkosti na sílu potřebnou ke zlomení výsušků



Z předešlých grafů je vidět, že vyšší vlhkost výsušků způsobuje zvýšení objemové hmotnosti i síly potřebné ke zlomení. Výsledky vlastností výsušků jsou však jen doplňující informací k vlastnostem vypálených střepek. V běžné praxi se zkoušky na výsušcích neprovádí. Co se týče vlivu vlhkosti na vlastnosti vypálených střepek, není z grafů viditelná závislost. Při suchém lisování ovlivňuje výslednou kvalitu mnoho faktorů. Může to být dáno např. nerovnoměrně rozptýlenou vlhkostí ve hmotě, nebo nízkým rozdílem obou vlhkostí. Závislost by byla pravděpodobně lépe patrná při porovnání více vlhkostí ve škále 1 % až 10 %. Dále je z grafů vidět, že hmota CP820M vykazuje odlišné hodnoty vlastností v porovnání s ostatními hmotami. Jako jediná ze čtyř zkoušených hmot je typu C520 (dle ČSN EN 60672) [28], ostatní jsou typu C511. Rozdíl

může být pravděpodobně dán vyšším obsahem MgO ve hmotě CP820M. Není ale cílem této bakalářské práce se tímto zjištěním hlouběji zabývat.

Při porovnání objemových hmotností vypálených střepů z jednotlivých hmot vidíme, že nejvyšších hodnot objemových hmotností dosahuje střep z hmoty CP823M, průměrně  $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Velmi podobné objemové hmotnosti mají vzájemně vzorky z hmot H 1033/ 11 B 12 ( $1940 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a H 1033/ 17 a/2 ( $1910 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Objemová hmotnost vzorků z hmoty CP820M se pohybuje pod hranicí  $1900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Nutno podotknout, že u různých typů hmot byla zaznamenána různá směrodatná odchylka. V některých případech dosahovala až hodnoty 50, zatímco v jiných případech pouze 6. Takto velký rozptyl může být zapříčiněn mnoha proměnnými při výrobě vzorků, od způsobu vlhčení, přes vytváření až po výpal. Pokud vezmeme v potaz různé teploty výpalu, můžeme říct, že u střepů z granulátů CP823M a H 1033/ 11 B 12 odpovídá vyšší teplotě i vyšší objemová hmotnost. To je očekávaná závislost, vzhledem k průběhu slinování a tím zmenšování objemu pórů ve střepu. Tato závislost se zcela neprojevila u střepů z hmot CP820M a H 1033/ 17 a/2.

Zdánlivá hustota je hmotnost vypáleného střepu na jednotku jeho objemu včetně uzavřených pórů. Vzorky z hmoty CP820M vykazovaly nejvyšší zdánlivou hustotu v porovnání s ostatními vzorky ( $2620$  až  $2740 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Poukazuje to tedy na nízký objem uzavřených pórů. Všechny ostatní vzorky dosahovaly nejvyšší zdánlivé hustoty (nad  $2500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) při teplotě výpalu  $1310 \text{ }^\circ\text{C}$ . Poté s rostoucí teplotou výpalu u těchto hmot zdánlivá hustota klesala. Podobně jako u objemové hmotnosti, i u zdánlivé hustoty jsou směrodatné odchylky rozdílné.

Zdánlivá pórovitost, tj. poměr objemu pórů k celkovému objemu včetně pórů, je jednoznačně nejnižší u hmoty CP823M. Mezi jednotlivými teplotami výpalu jsou značné rozdíly. Při teplotě  $1310 \text{ }^\circ\text{C}$  atakovala zdánlivá pórovitost hranici 20 %, poté ale se zvýšením teploty pórovitost klesala až na hodnotu 2 % při teplotě výpalu  $1375 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hmota CP820M z hlediska zdánlivé pórovitosti nevyhovuje požadavku max. 20 %, všechny skupiny vzorků z této hmoty vykazovaly pórovitost vyšší než 25 %. U hmot H 1033/ 11 B 12 a H 1033/ 17 a/2 se pórovitost při nižších teplotách výpalu pohybovala okolo 20 %, od teploty  $1320 \text{ }^\circ\text{C}$  ale dosahovala hodnot do 18 % a s rostoucí teplotou výpalu klesala až na konečnou hodnotu okolo 9 %. Nasákavost má podobný trend jako zdánlivá pórovitost. Nejnižších hodnot (do 10 %) opět dosahovala hmota CP823M,



naopak nejvíce nasákavý je střep z hmoty CP820M (cca 15 %). Zbylé dvě hmoty vykazovaly při teplotě výpalu 1275 °C nasákavost okolo 10 %, která se postupně s rostoucí teplotou snižovala až na hodnotu kolem 4,5 % při teplotě 1375 °C. Snížení zdánlivé pórovitosti a nasákavosti s rostoucí teplotou výpalu je dáno postupným slinováním a zmenšováním pórů. Směrodatné odchylky jsou u zdánlivé pórovitosti i nasákavosti v řádu desetin jednotek nebo jednotek, což značí velmi nízký rozptyl jednotlivých hodnot.

Hodnoty maximálních sil potřebných ke zlomení se v rámci jednotlivých hmot poměrně lišily. To je pravděpodobně dáno přítomností trhlinek na vzorcích. Příčinou vzniku trhlinek by mohl být způsob lisování bez odvzdušnění, nebo nevhodný režim výpalu.

Protože cílem této bakalářské práce je nalézt vhodný granulát, který by mohl být předmětem dalších experimentů pro možnost zavedení výroby keramických filtrů ve firmě Keramtech s.r.o., postupovalo se následovně. Dle normy ČSN EN 60672 je požadavek na minimální objemovou hmotnost  $1900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Všechny vzorky nevyhovující této podmínce se vyřadily a dále se pracovalo pouze s vyhovujícími vzorky. U vzorků s objemovou hmotností nižší než  $1900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  se nestanovovala síla potřebná ke zlomení. Dalším požadavkem je maximální pórovitost 20 %. Ze vzorků vyhovujících podmínce minimální objemové hmotnosti  $1900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  se vyřadily ty, které vykazovaly pórovitost vyšší než 20 %. Další podmínkou při výběru vhodných vzorků byla síla potřebná ke zlomení vyšší než 95 N. Mimo to se také věnovala pozornost průběhu lisování. Hmota CP823M vlhčená na 6 % vlhkosti, se při lisování lepila na nástroj. Hmota H 1033/11 B 12 vlhčená na 3,5 % vlhkosti byla po vylisování velmi křehká a chyběla jí mechanická pevnost potřebná k manipulaci se vzorky. Tyto dvě hmoty daných vlhkostí jsou proto označeny jako nevhodné. Po aplikování všech výše uvedených podmínek byly vybrány dvě vyhovující hmoty, jejichž vlastnosti můžeme vidět v následující tabulce.

**Tabulka 8.3: Vyhovující hmoty a jejich vlastnosti**

hmota	vlastnost	1275 °C	1310 °C	1320 °C	1345 °C	1375 °C
CP823M vlhkost 3,5 %	OH [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1960		2000	1990	
	PZ [%]	14,0		14,1	9,3	
	F [N]	107,2		104,62	95,9	
H 1033/11 B 12 vlhkost 6 %	OH [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]			1950		1990
	PZ [%]			17,6		11,6
	F [N]			96,0		109,2

## 9 ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce je nejprve přiblížena problematika zajištění vyšší kvality kovových odlitků. S úspěchem se k tomuto využívá filtrace roztaveného kovu pomocí keramickým filtrů. Je vysvětlen mechanismus filtrace i požadavky kladené na keramické filtry. Ty jsou při filtraci vystaveny současně mechanickému, chemickému i tepelnému namáhání. Především musí odolat dynamickému nárazu proudu kovu, teplotnímu šoku i erozivnímu působení taveniny.

Keramické filtry se ve firmě Keramtech s.r.o. vyrábí přetokovým lisováním, přičemž keramická hmota je vyráběna přímo ve firmě. Z ekonomických důvodů je snaha zavést výrobu filtrů suchým lisováním. V teoretické části jsou tedy popsány obě technologie výroby, které jsou vzájemně porovnány. Různými výzkumy bylo ověřeno, že nižší vlhkost vytvářecí hmoty snižuje objemovou hmotnost a zvyšuje pórovitost. Naopak při vyšším obsahu vlhkosti jsou příznivé podmínky pro slinování a keramický střepek pak vykazuje vyšší objemovou hmotnost i vyšší pevnost.

Cílem praktické části bylo posoudit vliv různých druhů směsi, vlhkosti směsi a různé vypalovací teploty na fyzikálně-mechanické vlastnosti vyrobených zkušebních vzorků a na základě stanovených vlastností vybrat granulát, se kterým by se dalo pracovat při dalším výzkumu. Na vzorcích se stanovila objemová hmotnost, zdánlivá hustota, zdánlivá pórovitost, nasákavost a síla potřebná ke zlomení. Z výsledků vidíme, že vzorky vyrobené z hmoty CP820M vykazovaly nejnižší hodnoty objemové hmotnosti a zároveň nejvyšší hodnoty zdánlivé pórovitosti. Požadavek na minimální objemovou hmotnost je  $1900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a maximální pórovitost 20 %. Ani jeden z těchto požadavků vzorky z hmoty CP820M nesplnily a tato hmota je považována za nevhodnou pro výrobu filtrů suchým lisováním. Tato odlišnost od ostatních hmot je pravděpodobně dána vyšším obsahem MgO ve hmotě CP820M. Dále se posuzovaly zbylé tři hmoty. Především objemová hmotnost, zdánlivá hustota a síla ke zlomení vykazovaly různé směrodatné odchylky, které v některých extrémních případech dosahovaly hodnoty i nad 50. Proto bych doporučovala brát výsledky experimentální zkoušky spíše jako vodítko pro další výzkum. Z výsledků je dále patrné, že vliv různé vlhkosti (3,5 % a 6 %) není nijak zásadní a nelze vidět žádnou závislost. V budoucím výzkumu by bylo lepší hodnotit vliv více vlhkostí např. od 1 % do 10 %. Co se týče vlivu teploty výpalu, je

patrné, že při zvyšující se teplotě výpalu výrazně klesala nasákavost a zdánlivá pórovitost.

Pokud sady zkušebních vzorků splnily požadavky na objemovou hmotnost a zdánlivou pórovitost, byly podrobeny zatěžování tříbodovým ohybem, kterým se stanovila síla potřebná ke zlomení. Požadavek na minimální hodnotu síly ke zlomení byl 95 N. Všechny sady vzorků, které sice splnily přechozí dva požadavky, ale nesplnily podmínku síly ke zlomení min. 95 N, byly také vyřazeny. Dále se přihlíželo také na průběh lisování. S přihlédnutím ke všem výše zmíněným podmínkám a požadavkům byly vybrány dvě hmoty, CP823M a H 1033/11 B 12, se kterými by se mohlo pokračovat v dalším výzkumu. V tom by mohlo proběhnout ověřovací lisování většího počtu kusů, které by se podrobily externím zkouškám (tepelná kapacita, vodivost, dynamická zkouška).

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Filtrace slévárenských slitin*. První. Brno: Česká slévárenská společnost, 2000. ISBN 80-02-01389-1.
- [2] BECHNÝ, Lubomír a Stanislav VRÁBEL. *Filtrácia materiálov na odliatky*. První. Žilina: ŽU, 2000. ISBN 80-7100-672-6.
- [3] Objemové filtry. *LANIK foam ceramic* [online]. Boskovice: LANIK, c2012-2017 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.lanik.eu/objemove-filtry/>
- [4] Slévárenská keramika: výrobky. *Keramtech* [online]. Žacléř: Keramtech, 2015 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.keramtech.cz/vyrobky/slevarenska-keramika:c1/>
- [5] *Keramtech: úvod* [online]. Žacléř: Keramtech, 2015 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.keramtech.cz/>
- [6] ROUČKA, Jaromír. *Zkoušky vlastností filtru typ 740 a 743: výrobce Elektroporcelán Žacléř*. Brno, 1993.
- [7] SOKOLÁŘ, Radomír. *Keramika: BJ01\_M01* [online]. První. Brno: VUT FAST Brno, b.r. [cit. 2017-04-15].
- [8] PYTLÍK, Petr a Radomír SOKOLÁŘ. *Stavební keramika: technologie, vlastnosti a využití*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-720-4234-3.
- [9] VALENTA, Ladislav. *Keramická příručka. 2., V Silikátovém svazu 1., dopl. a upr. vyd.* Praha: Silikátový svaz, 2007. ISBN 978-808-6821-467.
- [10] HANYKÝŘ, Vladimír. *Technologie keramiky*. 1. vyd. Hradec Králové: Vega, 2000. ISBN 80-900-8606-3.
- [11] POSPÍŠIL, Zdeněk a Aleš KOLLER. *Jemná keramika: Úvod a základy technologie*.

1. vyd. Praha: SNTL, 1981.
- [12] HERAINOVÁ, Marcela. *Keramické suroviny a jejich úprava*. 1. vyd. Praha: Silikátový svaz, 2002. Učebnice pro střední odborné školy (Silikátový svaz). ISBN 80-903-1132-6.
- [13] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [14] LACH, Vladimír. *Teoretické základy výroby pálených stavebních látek: keramika II*. 1. vyd. Praha: VN MON, 1989.
- [15] LACH, Vladimír. *Keramika*. 3. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0332-2.
- [16] *Introduction to ceramics*. 1st ed. New York: Wiley, 1960. ISBN 04-714-7883-0.
- [17] RIEDEL, Ralf. a I-Wei. CHEN. *Ceramics science and technology: Volume3: Synthesis and Processing*. First Edition. Germany: Wiley, 2011. ISBN 978-352-7311-576.
- [18] Závislost mezi vlhkostí granulátu a pórovitostí za suchalisovaných střepůna bázi elektrárenského popílku. SOKOLÁŘ, Radomír. *Construmat 2007 conference about structural materials*. 1. vyd. Ostrava: Technická univerzita, 2007, s. 129 - 131. ISBN 9788024815367.
- [19] READEY, Michael a F. MAHONEY. *Compaction of Spray-dried Ceramic Powders: An Experimental Study of the Factors that Control Green Density* [online]. 1995 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/125089>
- [20] SOKOLÁŘ, Radomír. The effect of shaping and firing technology on the properties of ceramic tiles based on two different kaolinic clays. *Materiali in tehnologije*. 2012, **46**(6), 689-694. ISSN 1580-2949.
- [21] Forming of thin porcelain tiles: A comparison between tape casting and dry pressing. *Ceramics International* [online]. 2014, **40**(2), 3761-3767 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884213011474>

- [22] AŠMARIN, G. Vliv objemu pórů na pevnostní charakteristiky keramiky. *Keramický zpravodaj: časopis pro silikátový průmysl*. 2012, **28**(6), 32-33.
- [23] HERAINOVÁ, Marcela. *Sušení a výpal*. 1. vyd. Praha: Silikátový svaz, 2003. Učebnice pro střední odborné školy (Silikátový svaz). ISBN 80-903-1137-7.
- [24] SOKOLÁŘ, Radomír. Metodika posuzování ekvivalence provozního a laboratorního výpalu. *Keramický zpravodaj: Časopis pro keramický průmysl*. 2010, **26**(4), 5-6. ISSN 1210-2520.
- [25] SOKOLÁŘ, Radomír. *Žárovzdorné jíly v ČR a metodika posuzování jejich vlastností*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2012. ISBN 978-807-2048-175.
- [26] SOKOLÁŘ, Radomír a Lenka SMETANOVÁ. *Keramika - laboratoře: Modul BJ02\_M01* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-05-15].
- [27] ŠAŠEK, Ladislav. *Laboratorní metody v oboru silikátů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981.
- [28] ČSN EN 60672: *Keramické a skleněné izolační materiály*. 2001.
- [29] Filter Cloth: Flexsil. *Smelko: Foundry products* [online]. Milton (Ontario), 2014 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://smelko.com>
- [30] Filtration and Gating Systems. *Carbongroup* [online]. Vietnam, 2011 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: [http://carbongroup.com.vn/en/products--amp--services\\_steel\\_foundry\\_filtration-and-gating-systems.html](http://carbongroup.com.vn/en/products--amp--services_steel_foundry_filtration-and-gating-systems.html)
- [TL] Technické listy granulátů

## SEZNAM ZKRATEK

[MPa] megapascal

[N] newton

[kN] kilonewton

[kg·m<sup>-3</sup>] kilonewton na metr krychlový

[%] procento

[μm] mikrometr

[mm] milimetr

[m] metr

[m<sup>3</sup>] metr krychlový

[g] gram

[ml] mililitr

[°C] stupeň Celsia

## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: Tabulky vlastností vypálených střepů

PŘÍLOHA 2: Grafy vlastností vypálených střepů