



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝVOJ KERAMICKÉ SKOŘEPINOVÉ FORMY PRO VÝROBU ROZMĚRNÝCH AL ODLITKŮ

DEVELOPMENT OF CERAMIC SHELL FOR MANUFACTURING OF LARGE AL INVESTMENT CASTINGS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Hýbal

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2018

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Ondřej Hýbal**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Slévárenská technologie  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Vývoj keramické skořepinové formy pro výrobu rozměrných Al odlitků**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Optimalizace složení keramické skořepinové formy pro rozměrné odlitky ze slitin hliníku zhotovené metodou vytavitelného modelu vhodné jak pro ruční tak robotické obalování.

### **Cíle diplomové práce:**

Návrh složení keramické skořepinové formy k výrobě Al odlitků zhotovených metodou vytavitelného modelu, vhodné jak pro ruční tak i robotický systém obalování.

### **Seznam doporučené literatury:**

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 09-017-1666-9.

CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.

HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství, 2001, č. 10, s. 570 –580. ISSN 0037-6825.

HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry, Proceedings of the World Technical Forum, Brno 1st – 3rd June, 2009.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o volbě nejvhodnějšího složení keramické skořepinové formy pro hliníkové odlitky lité metodou přesného lití. Nejvhodnější složení keramických skořepin je zvoleno na základě výsledků provedených zkoušek a také z ekonomického hlediska. Dále se tato práce zabývá zhodnocením současných podmínek výroby keramických skořepin ve slévárně Alucast, s.r.o. a doporučením pro stabilizaci procesu výroby keramických skořepinových forem.

### Klíčová slova

Technologie přesného lití, keramická skořepina, keramická suspenze, žáruvzdorný materiál, pojivo, moučka.

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with the choice of the most suitable composition of a ceramic shell mold for aluminum castings made by investment casting technology. The most suitable composition of the ceramic shells is chosen based on the results of the tests and from economic point of view. This thesis also deals with evaluation of the current conditions of the production of ceramic shells in Alucast, s.r.o and recommendations for stabilizing the process of manufacturing ceramic shell molds.

### Key words

Investment casting, ceramic shell, ceramic slurry, refractory material, binder, flour.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÝBAL, O. *Vývoj keramické skořepinové formy pro výrobu rozměrných Al odlitek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 61 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Vývoj keramické skořepinové formy pro výrobu rozměrných Al odlitků* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny na konci této práce.

V Brně dne 25. 5. 2018

.....

Bc. Ondřej Hýbal

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji prof. Ing. Milanovi Horáčkovi, CSc. a Ing. Jiřímu Němcovi za rady a připomínky při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu během studia.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	1
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE .....	1
PROHLÁŠENÍ.....	2
PODĚKOVÁNÍ .....	3
OBSAH.....	4
ÚVOD .....	9
1 TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU .....	10
1.1 Historie a vývoj .....	10
1.2 Výroba voskového modelu .....	11
1.3 Sestavení stromečku.....	11
1.4 Výroba skořepiny .....	12
1.4.1 Obalení keramickou suspenzí .....	12
1.4.2 Posypání žáruvzdorným materiálem.....	13
1.4.3 Sušení a chemické vytvrzování.....	13
1.4.4 Obalování na robotizovaném pracovišti .....	14
1.5 Vytavení voskové hmoty.....	15
1.5.1 Vytavení za vysoké teploty.....	15
1.5.2 Vytavení v autoklávu .....	15
1.5.3 Vytavení horkým vzduchem.....	15
1.5.4 Vytavení mikrovlnným ohřevem .....	16
1.6 Žihání skořepinové formy .....	16
1.7 Dokončovací operace .....	17
2 KERAMICKÁ SKOŘEPINOVÁ FORMA.....	18
2.1 Keramická suspenze.....	18
2.1.1 Příprava keramické suspenze.....	19
2.2 Posypové žáruvzdorné materiály .....	20
2.2.1 Oxid hlinitý (korund) – $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	20
2.2.2 Aluminosilikáty – $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ .....	21
2.2.3 Tavený křemen (křemenné sklo) – $\text{SiO}_2$ .....	23
2.2.4 Zirkon – $\text{ZrSiO}_4$ .....	24
2.3 Kontrola keramické suspenze .....	25
2.3.1 Kontrola teploty .....	25
2.3.2 Kontrola viskozity.....	25

2.3.3	Kontrola pH .....	26
2.3.4	Kontrola množství bakterií .....	26
2.3.5	Kontrola hustoty .....	27
2.3.6	Test obsahu žáruvzdorných látek (Drying test) .....	27
2.3.7	Destičková zkouška (Plate weight test) .....	27
2.3.8	Kontrola smáčivosti (Wetting test) .....	28
2.3.9	Odpěňovací test (Antifoam test) .....	28
2.4	Zkoušení keramické skořepiny .....	29
2.4.1	Pevnost v ohybu (MOR) .....	29
2.4.2	Prodyšnost.....	30
2.4.3	Teplotní roztažnost (DIL) .....	30
2.4.4	Spektrální elektronová mikroskopie (SEM) .....	31
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	32
3.1	Současný stav .....	32
3.2	Robotické pracoviště .....	33
3.3	Navrhovaná složení obalovacího systému .....	33
3.3.1	Varianta 1 .....	34
3.3.2	Varianta 2.....	34
3.4	Popis jednotlivých komponent .....	35
3.5	Výroba keramických skořepin .....	37
3.5.1	Voskové modely .....	38
3.5.2	Obalení keramikou.....	40
3.6	Testování keramických suspenzí.....	44
3.7	Zkoušení keramických skořepin .....	46
3.7.1	Pevnost v ohybu.....	46
3.7.2	Prodyšnost.....	48
3.7.3	Obrazová analýza.....	51
3.8	Zhodnocení.....	56
3.9	Doporučení.....	57
	ZÁVĚR .....	58
	SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY .....	59



## ÚVOD

Technologie přesného lití je jedna z nejsložitějších a nejnáročnějších technologií používaných pro výrobu odlitků. Tato technologie se řadí mezi near–net–shape technologie, což znamená, že umožňuje vyrábět tvarově velmi složité odlitky s úzkými rozměrovými tolerancemi a velmi kvalitní jakostí povrchu bez nutnosti dalších dokončovacích operací. Touto metodou lze odlévat téměř všechny materiály, což je výhoda především u obtížně obrobitelných materiálů jako je například titan a jeho slitiny.

Zákazníci v dnešní době kladou stále větší požadavky na rozměrovou přesnost odlitku, jakost povrchu, rychlost dodání hotového odlitku a samozřejmě také na výslednou cenu. To tlačí slévárny k neustálému zlepšování výrobních procesů, investicím do nových technologií a hledání nejvhodnějších řešení při výrobě finálních odlitků.

Jedním z nejsložitějších kroků ve výrobě odlitku metodou přesného lití je výroba keramické skořepinové formy. Materiály keramické skořepiny musí odolat nalitému kovu, aniž by s ním jakkoliv chemicky reagovaly. Keramická skořepina musí zajistit dostatečnou pevnost při vytavování vosku a také při samotném odlévání kovu. Další důležitou vlastností keramických skořepin je jejich prodyšnost, která zajistí odvod plynů při odlévání. Volba materiálů pro výrobu keramických skořepin s nejvhodnějšími parametry a s přijatelnou cenou je jedním z nejdůležitějších kroků při výrobě odlitků technologií vytavitelného modelu.

Diplomová práce se zabývá volbou nejvhodnějšího složení keramických skořepinových forem pro odlitky z hliníkových slitin ve slévárně Alucast, s.r.o. Doporučuje metody kontroly keramických suspenzí v provozu, které zajistí konstantní vlastnosti vyrobených skořepin.

## 1 TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU [1]

Technologie vytavitelného modelu se řadí mezi metody přesného lití, což znamená, že touto technologií lze vyrábět velice přesné odlitky složitých tvarů s úzkými rozměrovými tolerancemi, tenkými stěnami a velmi dobrou jakostí povrchu. Ve většině případů není nutné odlitky dále obrábět a dokončovací operace jsou minimalizovány. Touto metodou lze odlévat téměř všechny materiály, což je výhoda především u obtížně obrobitelných materiálů jako je například titan a jeho slitiny. V porovnání s technologií tlakového lití mají součásti vyrobené metodou vytavitelného modelu lepší mechanické vlastnosti. Technologií lití na vytavitelný voskový model lze dosáhnout velmi efektivního a ekonomicky výhodného řešení výroby finální součásti. Tato technologie se v dnešní době využívá na výrobu odlitků nejen pro letecký průmysl, zbrojní průmysl, ale také v lékařství pro odlévání kloubních náhrad a zubních protéz. V neposlední řadě se technologie lití na vytavitelný voskový model používá při výrobě uměleckých odlitků a ve šperkařství.

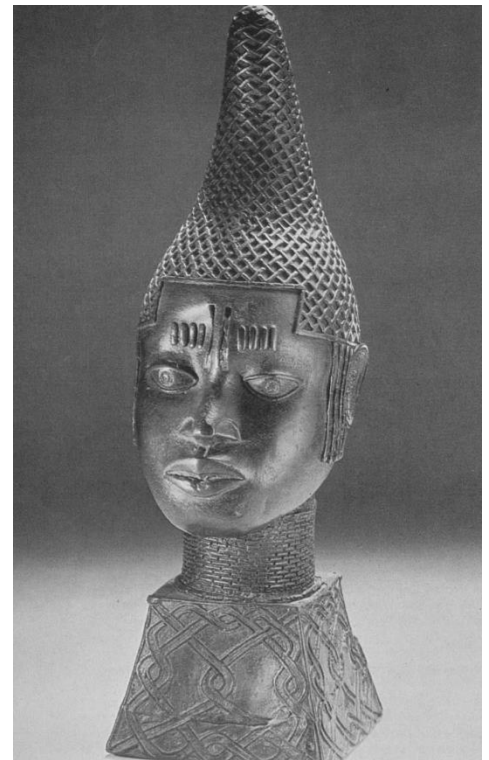
### 1.1 Historie a vývoj [2, 3]

Z historického pohledu se jedná o nejstarší technologii odlévání na světě. Je známá již několik tisíciletí, kdy se používala k výrobě uměleckých předmětů. Model byl vyroben ze včelího vosku a následně byl obalen hlínou, a tak vznikla forma.

V 19. století se na výrobu odlitků používaly převážně pískové formy a technologie vytavitelného modelu upadla téměř v zapomnění.

Největší rozmach této technologie nastal v období druhé světové války. Hlavním odběratelem odlitků byl zbrojní průmysl. Ukázalo se, že litím do pískových forem nelze zhotovit tvarově velmi složité odlitky s úzkými rozměrovými tolerancemi a kvalitní jakostí povrchu.

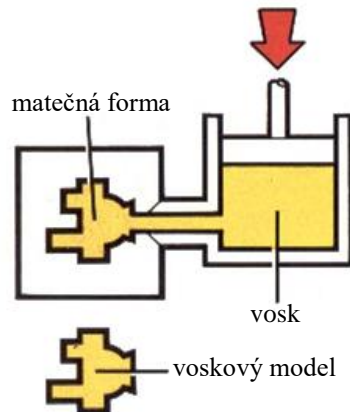
Dnes nacházejí odlitky vyrobené technologií vytavitelného modelu uplatnění v řadě průmyslových odvětví jako je letecký průmysl, zbrojní průmysl, automobilní průmysl, zdravotnictví, aj.



Obr. 1 Bronzová hlava (12. stol. n. l.) [1]

## 1.2 Výroba voskového modelu [1]

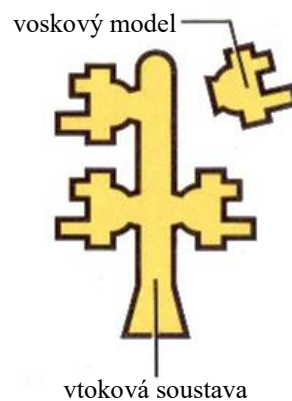
Celý proces výroby odlitku začíná u voskového modelu. Ten je zhotoven buď odlitím nebo častěji vstříknutím voskové směsi do tzv. matečné formy, jejíž dutina dává modelu tvar a rozměry. Na přesnost výroby matečné formy je kladen velký důraz, neboť konečné rozměry a přesnost odlitku jsou dány především přesně vyrobeným voskovým modelem, který závisí na přesnosti dutiny matečné formy. Matečné formy jsou v drtivé většině případů kovové. Další možností výroby voskového modelu je 3D tisk.



Obr. 2 Výroba modelu [1]

## 1.3 Sestavení stromečku [1]

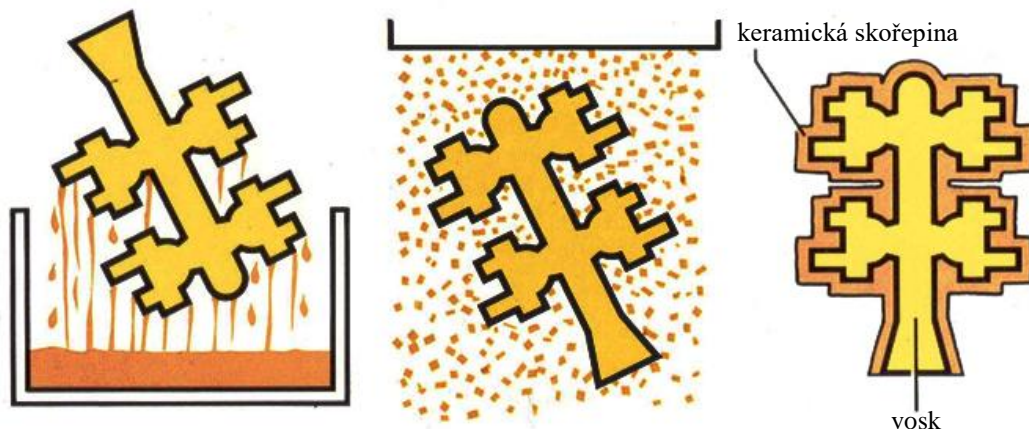
V další fázi je třeba připojit model ke vtokové soustavě. V případech, ve kterých je to možné z hlediska velikosti modelů se ke vtokové soustavě připevní vhodným způsobem více modelů a vzniká tzv. stromeček. Připojení modelů ke vtokové soustavě je možné provádět buďto pájením nebo lepením. Vtoková soustava bývá, na rozdíl od samotného modelu, často vyrobena z méně kvalitního, regenerovaného vosku. Při sestavování modelů do stromečku je nutné dbát na to, aby v následujících krocích došlo k dokonalému obalení všech míst keramikou a také na techniku obalování, protože velké rozměry stromečku znamenají i velkou hmotnost a pro ruční obalování by byly nevhodné. Dalšími parametry, které je nutno uvažovat při sestavování do stromečku je bezproblémové vytečení vosku při vytavování, způsob lití a také oddělení odlitků od vtokové soustavy.



Obr. 3 Sestavení stromečku [1]

## 1.4 Výroba skořepiny [3, 4]

Princip výroby keramické skořepinové formy spočívá v opakovaném nabalování jednotlivých vrstev. Každá vrstva vzniká nejprve ponořením voskového stromečku do keramické břečky, poté se posype žáruvzdorným materiálem a posledním krokem je sušení. Složení různých vrstev je odlišné. Na primární obaly se používá jiná suspenze než na další (zpevňující) obaly a totéž platí pro posypový materiál. Obvyklý počet vrstev pro dostatečnou pevnost skořepiny je 4 až 15 v závislosti na velikosti skořepiny a typu odlévaného materiálu. Proces obalování lze automatizovat pomocí robotizované linky. Na kvalitu výsledné skořepinové formy má vliv značné množství parametrů, jakými jsou složení keramické suspenze, typ posypového materiálu, způsob, jakým je posyp prováděn, klimatické podmínky při sušení a mnohé další.

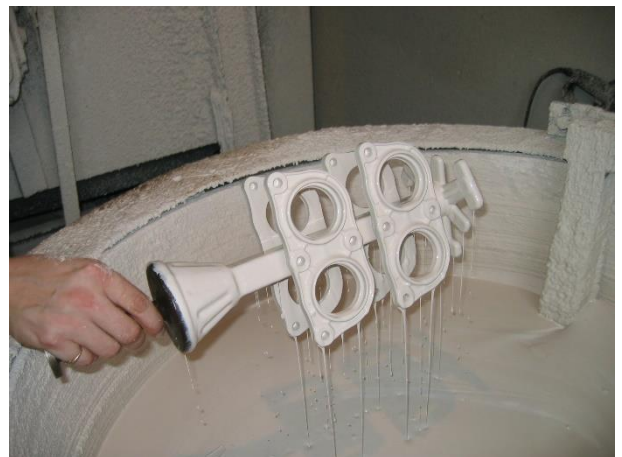


Obr. 4 Princip výroby skořepinové formy [1]

### 1.4.1 Obalení keramickou suspenzí

Před samotným ponořením modelových stromečků do primární keramické suspenze je nutné z povrchu vosku odstranit ulpělý dělicí prostředek (separátor), který slouží pro jednodušší vyjmutí modelu z matečné formy. Pokud by na vosku zůstaly zbytky separátoru, první obal by k povrchu modelu nepřilnul dokonale, a to by mohlo být příčinou vzniku vad skořepiny. Některé dělicí prostředky obsahující smáčedla není nutné před prvním namočením do suspenze odstraňovat.

Namáčení do keramické břečky musí být provedeno takovým způsobem, aby byl dokonale a rovnoměrně pokryt celý povrch voskového stromečku. Stromeček musí zůstat ponořený, dokud břečka nezateče do všech míst a neuniknou vzduchové bublinky. Po vyjmutí z břečky se se stromečkem různě manipuluje, otáčí a naklání, aby došlo k rovnoměrnému pokrytí, přebytečná břečka okapala a aby v koutech, drážkách nebo rozích nezůstaly vzduchové polštáře.



Obr. 5 Obalení břečkou [5]

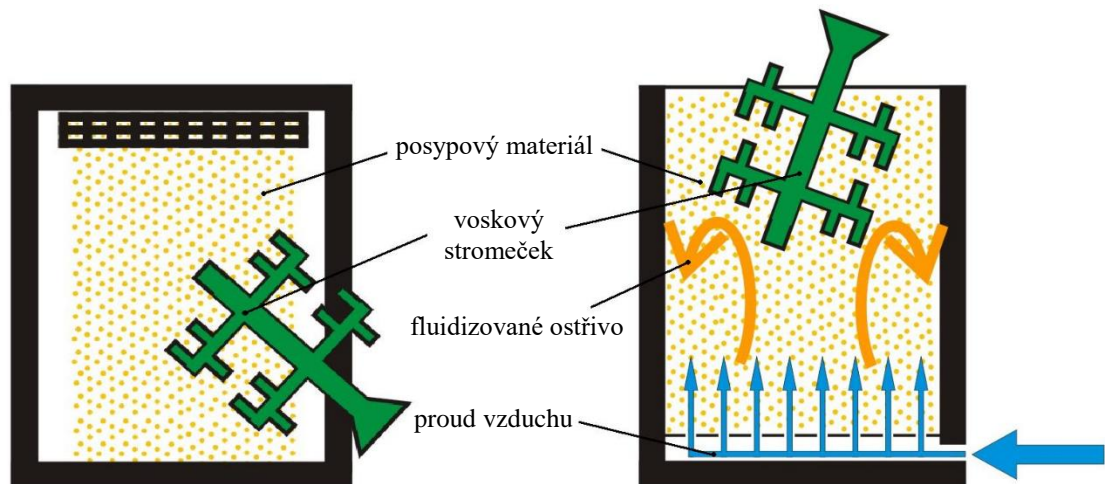
Na primární obaly se používá zpravidla břecha s menší viskozitou než pro další obaly. Receptury keramických suspenzí pro primární a další obaly se liší a je na slévárně, jaké složení zvolí. Následuje posyp žáruvzdorným ostřivem.

### 1.4.2 Posypání žáruvzdorným materiálem

Druhým krokem při výrobě skořepinové formy je posypání ostřivem o vhodně zvolené zrnitosti. Obecně platí, že na první obaly, které mají zajistit kvalitu povrchu odlitku, se používá jemnější ostřivo než pro další zesilující obaly. Zrnitost posypových materiálů prvních obalů bývá v rozmezí 0,1–0,25 mm. Pro další obaly se používá ostřivo o zrnitosti 0,25–0,5 mm. Důvodem použití hrubšího ostřiva na zesilující obaly je zejména lepší prodyšnost. Posypový materiál má mít takové rozdělení velikosti zrna, aby měla vyrobená skořepina stejnoměrnou tloušťku na celém povrchu, a to i na hranách, dostatečnou pevnost a vyhovující prodyšnost.

Posyp keramickým ostřivem je možné provádět dvěma způsoby:

- Fluidní posyp**, při kterém je stromeček ponořen do vzduchem čerého ostřiva. Uvádí se, že fluidní posyp zajišťuje mnohem rovnoměrnější posypání. Při fluidním posypu bývá ostřivo v horní části jemnější a ve spodních vrstvách naopak hrubší.
- Sprchový posyp**, při kterém ostřivo volně padá shora na stromeček.



Obr. 6 Sprchový posyp (vlevo) a fluidní posyp (vpravo) [6]

### 1.4.3 Sušení a chemické vytvrzování

Celý cyklus výroby jedné vrstvy obalu je završen sušením a tuhnutím skořepiny. Tuhnutí probíhá odpařením disperzního prostředí z kapalného pojiva, čímž se koloidní částice k sobě přibližují. To vyvolá stavovou změnu solu v gel. Tuto změnu je možné vyvolat i chemickými činidly. V současnosti existuje na trhu technologie vysokorychlostního sušení, která využívá infralampy a pomocí infračerveného světla urychluje schnutí obalů. Dobu sušení ovlivňuje mnoho faktorů.



Faktory ovlivňující dobu sušení:

- a) **Geometrie stromečku**
- b) **Použité pojivo**
- c) **Velikost zrna posypového materiálu** má také vliv na dobu sušení obalů. S rostoucí velikostí zrna roste i rychlost schnutí.
- d) **Teplota v sušárně** je velmi důležitá a neměla by kolísat, jinak je velké riziko, že se voskové modely vlivem teplotní roztažnosti roztáhnou a obaly popraskají.
- e) **Vlhkost v sušárně** by měla být okolo 50 %. Samozřejmě, že s klesající vlhkostí je třeba kratší čas na vysušení obalu.
- f) **Proudění vzduchu v sušárně** znamená urychlení sušení.

V klimatizované sušárně by měla být teplota 20–23 °C a vlhkost by neměla přesáhnout 50 %. Při takovýchto podmínkách schne jeden obal 2 až 4 hodiny. Jak již bylo zmíněno, je velmi důležité hlídat, aby proces obalování a sušení probíhal při stejné teplotě a voskový model neměnil rozměry vlivem teplotní roztažnosti, což by mělo za následek popraskání obalu.

#### 1.4.4 Obalování na robotizovaném pracovišti

V dnešní době je snaha co nejvíce automatizovat procesy a přechod od klasického ručního obalování na robotizované obalovací linky dokáže zvýšit efektivitu při výrobě forem. Přechodem na robotizovanou linku je docíleno snížení počtu pracovníků, což je vzhledem k aktuální situaci na trhu práce pozitivní. Navíc jsou z procesu výroby keramických skořepin eliminovány chyby způsobené lidským faktorem. Další výhodou je možnost vyrábět odlitky větších rozměrů, které by lidský pracovník nebyl schopen obalit z důvodu velké hmotnosti. V automatizovaném procesu je také mnohem jednodušší kontrola a optimalizace.

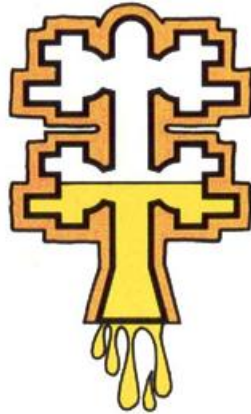
Postup výroby keramické skořepiny na robotizovaném pracovišti je stejný jako u klasického ručního obalování. Nejprve je voskový stromeček (nebo několik stromečků současně) uchycen do robotizovaného ramene a za rotace je ponořen do keramické suspenze. Následuje okapání přebytečné suspenze a taková manipulace se stromečkem, aby došlo k rovnoměrnému pokrytí celého povrchu. Poté je stromeček posypán žáruvzdorným materiálem a robot jej přesune do sušící komory. Po dostatečném vysušení nanesené vrstvy se proces opakuje.



Obr. 7 Robotizované pracoviště obalovny [7]

## 1.5 Vytavení voskové hmoty [3, 6]

Po dokonalém vysušení poslední vrstvy obalu následuje vytavení voskového modelu za účelem vzniku dutiny pro odlévaný kovový materiál. Pro natavení voskové hmoty jsou dostačující teploty v rozmezí 60–90 °C. Takto nízké teploty jsou pro vytavování nevhodné, jelikož by docházelo k rovnoměrnému ohřevu celého voskového modelu, který by díky větší teplotní roztažnosti v porovnání s keramickým materiálem mohl způsobit popraskání skořepiny. Vytavování se provádí tzv. tepelným šokem, kdy se rychlým ohřevem nataví vnější vrstva vosku a vznikne dilatační spára (vrstva tekutého vosku) mezi modelem a skořepinou. Tato spára umožňuje modelu dále volně dilatovat a nedochází tak k potrhání skořepiny. Vytavený vosk se upravuje a dále používá. K vytavení vosku se používá řada různých technologií.



Obr. 8 Vytavení vosku [1]

### 1.5.1 Vytavení za vysoké teploty

Při tomto způsobu vytavení (angl. flash fire system) se obalené stromečky vloží do pece, kde při pracovní teplotě 900 až 1100 °C dojde k vytavení vosku a zároveň k vyžhání skořepiny. Celý tento proces trvá 15–25 minut. Výhodou tohoto způsobu vytavení je tepelný šok, který zajistí, že se vosk těsně u skořepiny rychle nataví a vytvoří se dilatační spára, která zabrání potrhání skořepiny. Nevýhodou je však částečné znehodnocení a až 15% ztráty vosku vlivem vysoké teploty.

### 1.5.2 Vytavení v autoklávu

V současnosti je nejrozšířenější technologií vytavování vosku působením syté vodní páry v tlakové nádobě. V praxi se používají zařízení, která vyvinou tlak 0,3–0,6 MPa a pracují s teplotou páry okolo 160 °C. U tohoto způsobu dochází k prudkému tepelnému šoku na povrchu modelu, což je při vytavování vosku příznivé. Oproti vytavení za vysoké teploty jsou menší ztráty vosku.

### 1.5.3 Vytavení horkým vzduchem

Vytavení vosku horkým vzduchem se provádí tak, že se do středu vtokového kůlu fouká proud horkého vzduchu, který odtaví střed kůlu dříve, než se ohřeje celý model. Voskový model se v podstatě odtavuje zevnitř a tím se zabrání potrhání skořepiny.

### 1.5.4 Vytavení mikrovlnným ohřevem

Technika vytavení vosku mikrovlnným ohřevem patří mezi jednu z nejnovějších metod. Nejdříve se skořepina lehce navlhčí vodou a poté se umístí do mikrovlnného pole. Navlhčená skořepina se velmi rychle ohřeje, od ní se začne zahřívat vosk a vznikne dilatační spára mezi stěnou formy a voskovým modelem. Vytavením mikrovlnným ohřevem dochází pouze k minimálnímu znehodnocení vosku. Při mikrovlnném ohřevu nedochází ke vzniku spalin, a navíc je tato metoda vytavení vosku ekonomicky výhodná.

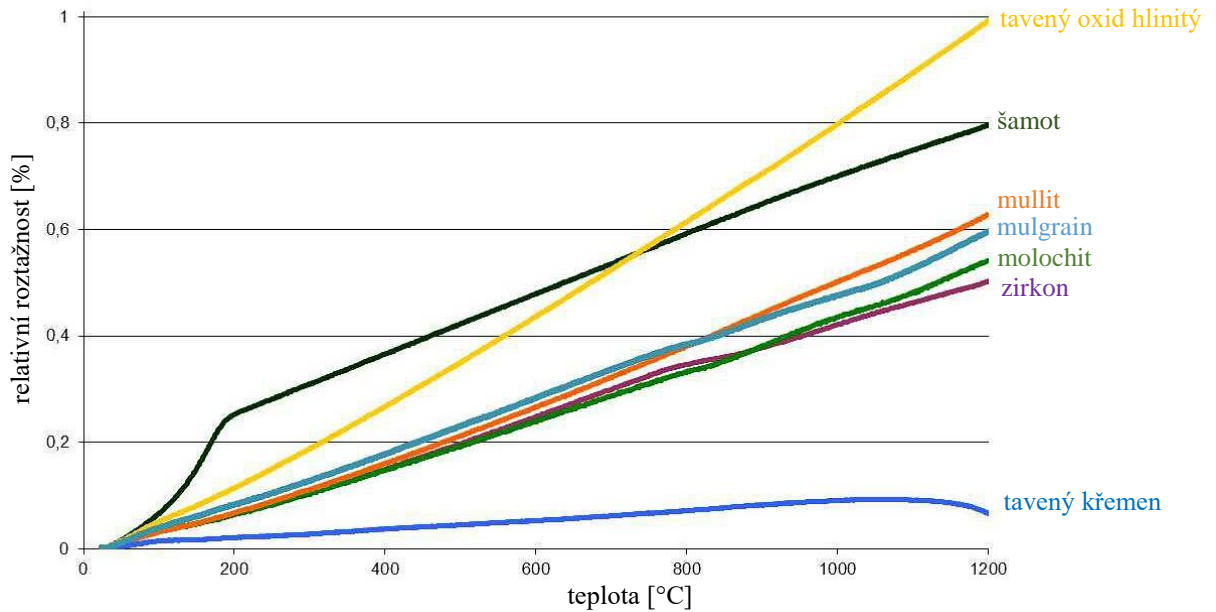
### 1.6 Žihání skořepinové formy [1, 3, 6]

Před samotným odléváním kovu je třeba keramickou skořepinu vyžihat. Žiháním dojde ke změně amorfní formy vrstvy  $\text{SiO}_2$  na formu krystalickou. Tím se dosáhne požadované pevnosti a tvrdosti skořepiny. Žiháním dojde k odstranění nežádoucích látek jako je voda a zbylý vosk, který se nepodařilo vytavit. Žihání také slouží k předehřevu skořepiny před odléváním. U nepředehřátých forem by vlivem rychlého odvodu tepla, převážně z tenkých stěn odlitku, mohlo dojít ke ztuhnutí kovu dříve, než by zatekl do všech míst formy a vznikl by tak zmetkový odlitek.

Žihací teploty závisí na typu odlévaného kovu a na materiálech použitých při výrobě skořepiny. Je jasné, že teploty žihání pro odlévání hliníkových slitin budou rozdílné od teplot žihání skořepin určených pro odlévání oceli. Pro dosažení požadovaných vlastností skořepiny se teploty žihání pohybují v rozmezí 900 až 1100 °C. Teplotní režim pece je závislý na vlastnosti keramického materiálu odolávat teplotním nárazům. Čím více materiál mění svůj objem při změně teploty, tím musí být pomalejší rychlost ohřevu a rovnoměrnější prohřívání celé skořepiny. Z hlediska teplotní roztažnosti se jeví jako nejvhodnější materiál tavený křemen. Naopak největší koeficient teplotní roztažnosti má  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Srovnání různých posypových materiálů dle jejich teplotní roztažnosti je uvedeno v grafu 1 na další straně. Další používané žáruvzdorné materiály a jejich vlastnosti jsou popsány v kapitole 2.2.

Teplota žihání skořepiny určené pro odlévání slitin hliníku se pohybuje v rozmezí 650 až 850 °C. Žiháním při takovýchto teplotách nedosahuje skořepina vysokých pevností, a proto je nutné volit materiál, který zajistí takovou pevnost skořepiny, aby odolala metalostatickému tlaku nalitého kovu.

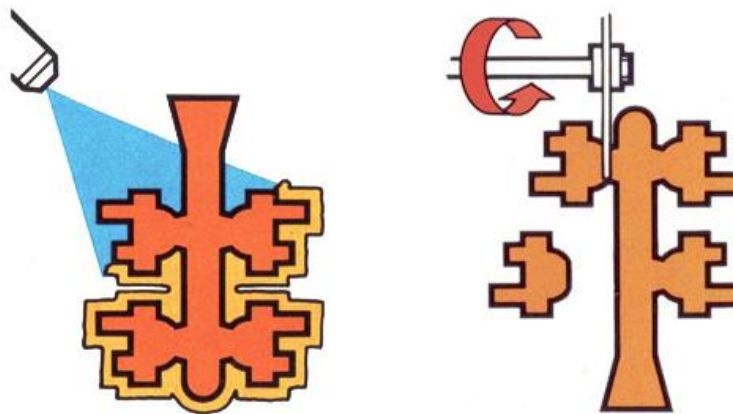




Graf 1 Tepelná roztažnost různých žáruvzdorných ostřiv [8]

### 1.7 Dokončovací operace [1]

Po ztuhnutí a vychladnutí kovu je třeba nejprve odstranit skořepinu. To se dělá buďto vibračním způsobem, otryskáním nebo ostříkáváním vysokým tlakem vody. Zbytky keramiky lze také rozpustit chemicky. Po odstranění zbytků keramiky je nutné odřezat jednotlivé odlitky, zabrousit zbytky po vtokové soustavě, případně odstranit vady, které na odlitku vznikly. Závěrečným krokem, který si některé odlitky vyžadují je tepelné zpracování.



Obr. 9 Odstranění skořepiny a odřezání odlitků [1]

## 2 KERAMICKÁ SKOŘEPINOVÁ FORMA

Technologie přesného lití je charakteristická svou nedělenou formou, která je jednorázová, a voskový model potřebný k vyrobení keramické formy se vždy zničí vytavením, tudíž je pro každou formu nutné vyrobit nový model. Výhodou nedělených skořepinových forem je, že lze touto technologií vyrobit tvarově složité odlitky, které jsou ostatními technologiemi nevyrobitelné. Také škála materiálů, které se lijí do keramických skořepinových forem je široká, tzn. že se odlévají všechny druhy kovových materiálů včetně superslitin. Pro zvládnutí výroby odlitku technologií vytavitelného modelu s co nejmenším počtem zmetků je třeba znát charakteristiky a vlastnosti keramických formovacích materiálů a vědět, jak se skořepina chová při teplotních změnách, ke kterým dochází vytavováním voskové hmoty, vyžháním skořepiny a odléváním roztaveného kovu. Výroba keramické skořepiny je při technologii přesného lití stěžejní proces, který rozhoduje o kvalitě finálního odlitku.

### 2.1 Keramická suspenze [3, 6]

Keramická suspenze neboli břecha je velmi viskózní kapalina, která se skládá ze dvou základních komponent, a to pojiva (koloidní roztok) a plniva (žáruvzdorná moučka). Keramická suspenze může obsahovat i další aditiva jako smáčedla, odpěňovací přípravky nebo antibakteriální přísady. Pojiva keramických suspenzí mohou být buďto na bázi vody, tyto nazýváme hydrosoly, anebo alkosoly, které jsou na alkoholové bázi. Pojivo musí dát formě dostatečnou pevnost jak po vysušení, tak po vyžhání a musí být netečné k žáruvzdornému materiálu a k odlévanému kovu.



Obr. 10 Nádoby s keramickou suspenzí

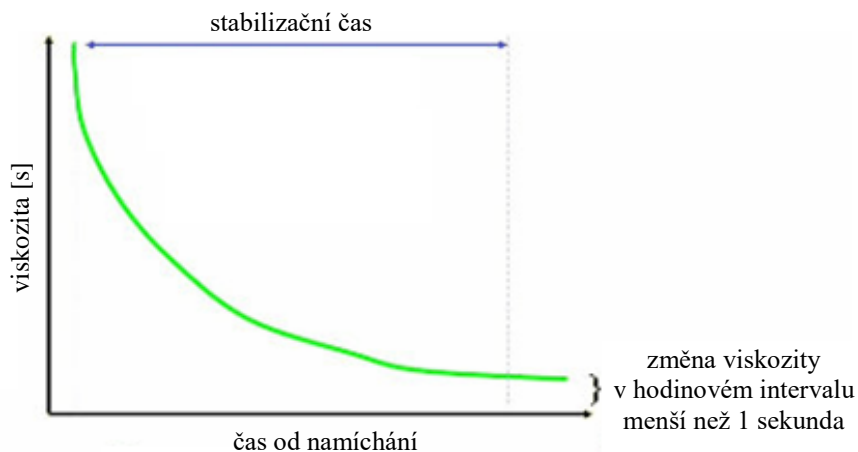
Hydrosoly se vyznačují vyšší pevností a menším sklonem k praskání lící vrstvy. PH pojiv na vodní bázi se pohybuje od 8 do 10. Stabilitu hydrosolového pojiva negativně ovlivňují především faktory jako nízké pH, velikost částic (menší částice mají horší stabilitu), množství  $\text{SiO}_2$  a teplota. Výhodami používání pojiv na bázi vody jsou šetrnost k životnímu prostředí, lepší pracovní podmínky, nižší náklady. Mezi nevýhody hydrosolových pojiv patří delší doba sušení a citlivost na změny pH.

Pojiva na bázi alkoholu mají kratší dobu sušení obalů a dobrou pevnost u nevyžháných skořepin. Mezi jejich nevýhody však patří horší pracovní podmínky vlivem alkoholových výparů, krátká životnost keramické hmoty a také bezpečnost (výbušné prostředí).

### 2.1.1 Příprava keramické suspenze

Příprava keramické suspenze spočívá v dokonalém promíchání všech komponent v předepsaném poměru. Při míchání musí dojít k dokonalému obalení částic moučky tekutým pojivem a k úniku všech vzduchových bublinek, které se spolu s moučkou dostaly do suspenze. Příprava keramické suspenze je považována za hotovou, jakmile dojde k ustálení viskozity. To znamená, že v hodinovém intervalu měření je změna hodnoty viskozity menší než jedna sekunda. Čas potřebný k namíchání hotové břečky je přímo ovlivněn rychlostí míchání. Obecně platí, že příprava keramické suspenze pro první obaly zabere delší dobu než příprava břečky pro zpevňovací obaly, a to z důvodu jemnějších podílů v receptuře primární břečky. Keramická suspenze pro tvarově složitě odlitky by měla být řidší, aby se dostala do všech míst na modelu. Na první, případně druhé obaly se používají břečky s menší viskozitou než na ostatní obaly.

Keramická suspenze s časem stárne a mění své vlastnosti. Podíl nejjemnějších částic klesá, pevnost v ohybu klesá a roste sklon k praskání skořepiny. Pokud je keramická suspenze v klidu, dochází vlivem sedimentace žáruvzdorného plniva ke změně viskozity. Proces obalování a kvalita keramické suspenze má přímý vliv na výslednou kvalitu odlitku, a proto je velmi důležité udržovat konstantní vlastnosti břečky.



Graf 2 Ustálení viskozity při míchání keramické suspenze [6]

## 2.2 Posypové žáruvzdorné materiály [3, 9, 10, 11, 12]

V dnešní době je pro výrobu keramických skořepin využíváno velké množství posypových žáruvzdorných materiálů. Jejich úkolem je zajistit skořepině vysokou pevnost a únosnost v žáru. Posypové materiály by neměly reagovat s odlévanými slitinami, měly by mít minimální objemové změny během výrobního procesu a také by měly zaručit vyhovující prodyšnost. Jenom skořepiny s takovými vlastnostmi dokážou zaručit kvalitu u velkých a těžkých odlitků. U velkých odlitků, kdy je do skořepiny nalito velké množství tekutého kovu dochází k měknutí a deformaci skořepiny. To může způsobit, že i odlitek bude zdeformovaný a z pohledu zákazníka nevyhovující. V případech, kdy je skořepina nedostatečně prodyšná a plyny z roztaveného kovu a uzavřený vzduch nemohou skrze stěny formy uniknout, kov nedokáže dokonale vyplnit dutinu formy a odlitky budou nezaběhlé se špatnou jakostí povrchu. Pro první obaly keramické skořepiny se používá jemnější materiál se zrnitostí 0,1–0,25 mm, který zajistí kvalitu povrchu odlitku, a na další obaly se používá hrubší ostřívo o zrnitosti 0,25 mm a více z důvodu zajištění prodyšnosti skořepiny.

### 2.2.1 Oxid hlinitý (korund) – $\text{Al}_2\text{O}_3$

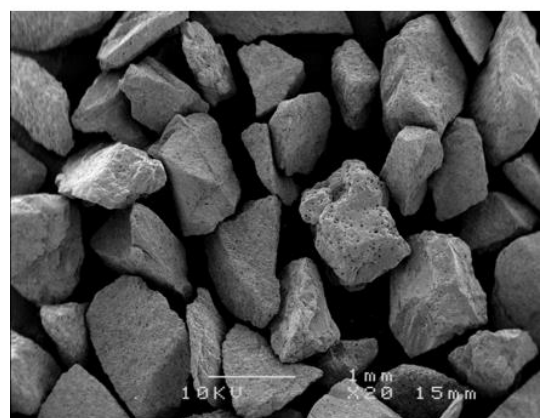
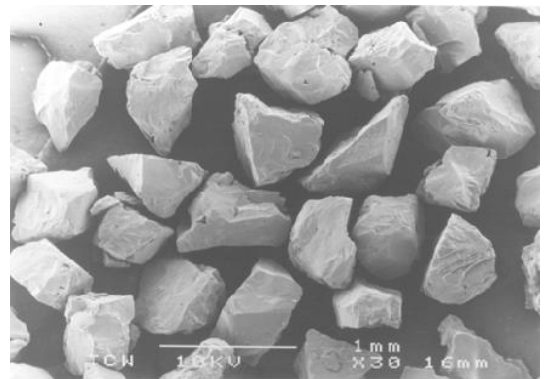
Oxid hlinitý je krystalická látka, která krystalizuje v několika různých modifikacích. Nejběžnější je modifikace  $\alpha$ , která má klencovou (trigonální) krystalovou mřížku. Chemické složení je velmi blízké čistému  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (99,6 %). Oxid hlinitý má velmi velkou tvrdost (druhou nejvyšší na Mohsově stupnici tvrdosti) a chemicky nereaguje s odlévaným kovem. Jeho nevýhodou je nebezpečí popraskání skořepiny vlivem teplotního šoku z důvodu velké teplotní roztažnosti. Používáme dva různé typy oxidu hlinitého, tavený a tabulární.

Tavený oxid hlinitý se vyrábí tavením čistého oxidu hlinitého v elektrické obloukové peci. Teplota tavení je 2054 °C a celý proces výroby taveného oxidu hlinitého je energeticky náročný.

Výroba tabulárního oxidu hlinitého spočívá ve spékání (slinování) kalcinovaného oxidu hlinitého. Slinování je proces, při němž se prášková hmota zahřeje na vysokou teplotu, avšak pod teplotu jejího tání, přičemž dojde ke vzájemnému splnutí práškových částic. Tabulární  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je mírně porézní.

Vlastnosti oxidu hlinitého:

- Hustota: 3900 kg/m<sup>3</sup> (tavený  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
a 3550 kg/m<sup>3</sup> (tabulární  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Tvrdost (Mohsova stupnice): 9,3
- Teplota tání: 2054 °C
- pH: 8,5–9,5
- Koeficient teplotní roztažnosti:  
 $8,2 \times 10^{-6}$  [1/°C]

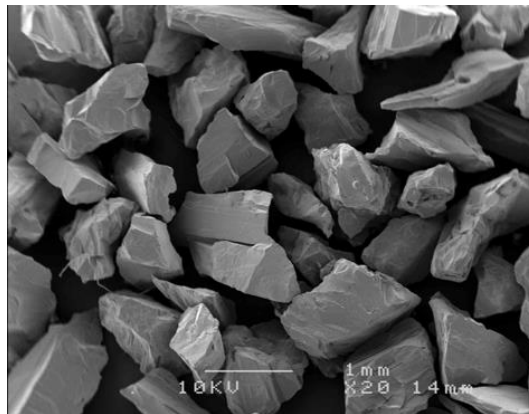


Obr. 11 Tavený oxid hlinitý (nahore) a tabulární oxid hlinitý (dole) [10]

### 2.2.2 Aluminosilikáty – $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$

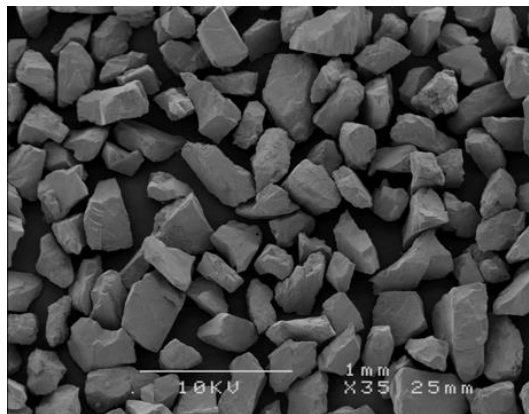
Aluminosilikátové posypové materiály jsou získávány těžbou kaolinu, bauxitu a jílu a jsou různě kombinovány, aby se dosáhlo požadovaného chemického složení. Dvě základní složky aluminosilikátových ostřiv jsou oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ). PH těchto typů ostřiv se pohybuje v rozmezí 6,5–7,8.

Tavený mullit je vyráběn roztavením a následnou krystalizací oxidu hlinitého, kterého obsahuje okolo 76 %, a oxidu křemičitého. Mullit má velkou tepelnou (odolává teplotám do 1900 °C) a chemickou stabilitu. V porovnání s ostatními aluminosilikátovými ostřivy má větší hustotu (3140 kg/m<sup>3</sup>).



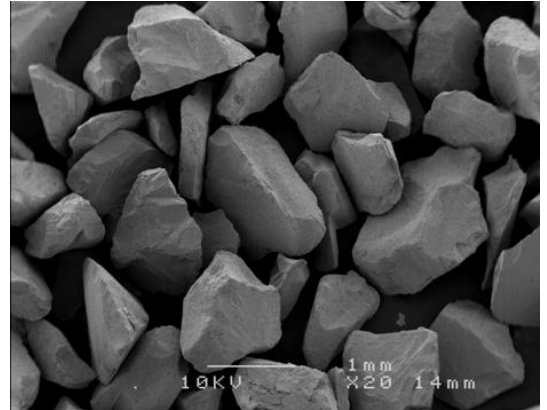
Obr. 12 Mullit [10]

Dalším aluminosilikátovým ostřivem je andalusit. Obsahuje zhruba 61 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a 38 %  $\text{SiO}_2$ . Získává se separací z rudy. Andalusit se vyznačuje nízkým obsahem nečistot.



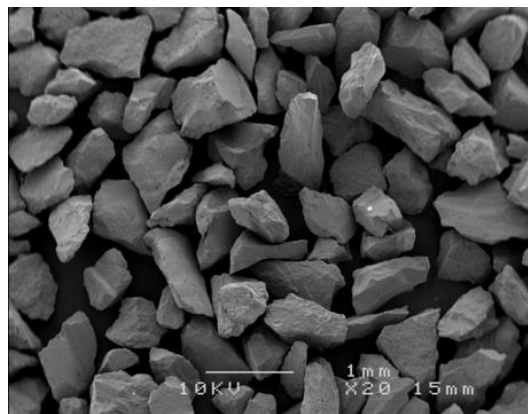
Obr. 13 Andalusit [10]

Molochit je vyráběn kalcinací kaolinů při teplotě kolem 1500 °C po dobu 24 hodin. Obsah oxidu hlinitého v molochitovém ostřivu je 42 %. Velkou předností je to, že neobsahuje cristobalit, to je forma oxidu křemičitého, ze kterého, pokud je vdechován, vzniká plicní nemoc silikóza. Molochit dokáže odolat teplotám až 1770 °C. Molochit má velice malý koeficient teplotní roztažnosti, který je roven  $4,4 \times 10^{-6}$  [1/°C], což je velmi blízko mnohem dražším zirkonovým ostřivům. Jeho hustota je 2,7 g/cm<sup>3</sup>, což je v porovnání s ostatními aluminosilikátovými ostřivy nižší hodnota, a tudíž i výsledná hmotnost skořepiny z molochitu je nižší než hmotnost mullitové nebo andalusitové skořepiny.



Obr. 14 Molochit [10]

Šamotová ostřiva se vyrábí kalcinací lupku a skládá se ze 40–48 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Jejich teplotní odolnost dosahuje maximálně 1770 °C. Šamotová ostřiva obsahují cristobalit a to v rozmezí 10–20 %. Cristobalitem je negativně ovlivněna teplotní roztažnost mezi teplotami 20–200 °C.



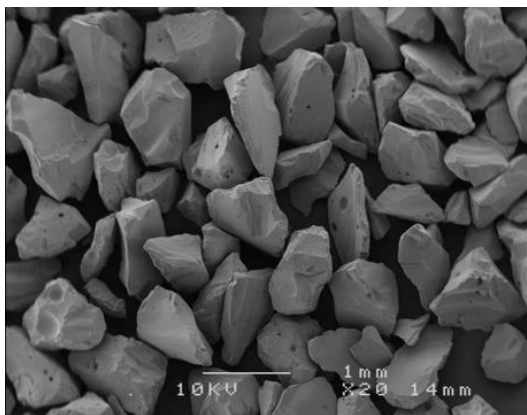
Obr. 15 Šamot [10]

Tab. 1 Porovnání teplotní roztažnosti a hustoty aluminosilikátových ostřiv

Typ ostřiva	Koeficient teplotní roztažnosti [1/°C]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Mullit	$5,1 \times 10^{-6}$	3140
Andalusit	$6,5 \times 10^{-6}$	3100
Molochit	$4,4 \times 10^{-6}$	2700
Šamot	$5,5-7 \times 10^{-6}$ $6,5-14 \times 10^{-6}$ (20–200 °C)	2600–2700

### 2.2.3 Tavený křemen (křemenné sklo) – SiO<sub>2</sub>

Křemenné sklo je vyrobeno z čistého oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>) a neobsahuje žádné další příměsi. Tavený křemen je amorfní látka. To znamená, že nemá pravidelnou krystalickou strukturu a uspořádání částic je čistě náhodné. Výroba probíhá tavením nejčistšího oxidu křemičitého v elektrické obloukové peci při teplotě 2000 °C. Tento proces výroby je velmi energeticky náročný. Po pomalém ochlazení (v řádu dní) se vzniklé ingoty drtí a melou na požadovanou zrnitost. Tavený křemen má extrémně nízkou teplotní roztažnost, což je výhodou vzhledem k teplotním změnám v průběhu žíhání skořepiny a lití kovu. Křemenné sklo má také nízkou hustotu.



Obr. 16 Tavený křemen [10]

Tab. 2 Typické chemické složení ostřiv z taveného křemene

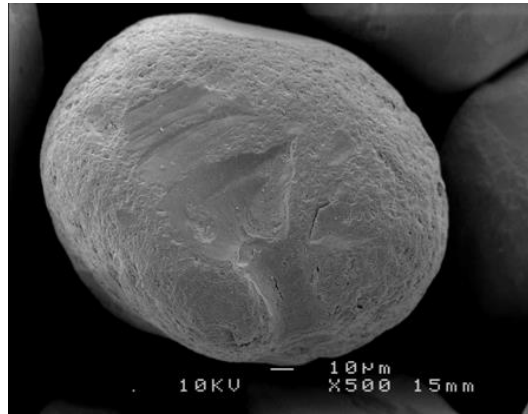
Tavený křemen	
Druh oxidu	Obsah
SiO <sub>2</sub>	99,7 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1000–1500 ppm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	300–350 ppm
CaO	50 ppm
MgO	50 ppm
Na <sub>2</sub> O	50 ppm
K <sub>2</sub> O	50 ppm

Vlastnosti taveného křemene:

- Hustota: 2200 kg/m<sup>3</sup>
- Tvrdost (Mohsova stupnice): 5,3–6,5
- Teplota tání: 1650 °C
- pH: 6–7,5
- Koeficient teplotní roztažnosti:  $<1 \times 10^{-6}$  [1/°C]

### 2.2.4 Zirkon – $ZrSiO_4$

Zirkon je přírodní minerál, který se získává z vytěžených minerálních písků díky sedimentaci a elektrostatické a magnetické separaci. Tvar zrn zirkonových ostřiv je zakulacený. Zirkonová ostřiva mají výhodu ve schopnosti odolávat velmi vysokým teplotám až do 2250 °C, jsou málo reaktivní s odlévaným kovem a mají nízkou teplotní roztažnost. Jejich nevýhoda spočívá v jejich ceně, a proto jsou používány výhradně pro primární obalové vrstvy u náročných odlitků.



Obr. 17 Zirkon [10]

Tab. 3 Typické chemické složení zirkonových ostřiv

Zirkon	
Druh oxidu	Obsah
ZrO <sub>2</sub>	>65 %
SiO <sub>2</sub>	<33,6 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<2 %
TiO <sub>2</sub>	<0,35 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,05 %

Vlastnosti zirkonu:

- Hustota: 4600 kg/m<sup>3</sup>
- Tvrdost (Mohsova stupnice): 7,5
- Teplota tání: 2250 °C
- pH: 4,7–7
- Koeficient teplotní roztažnosti:  $4,2 \times 10^{-6}$  [1/°C]



## 2.3 Kontrola keramické suspenze [6, 13, 14, 15]

Kontrola a udržování stálých vlastností keramické suspenze (tzv. břechky) je velmi důležitá součást celého procesu výroby konečného odlitku. Vlastnosti břechky ovlivňují například tloušťku skořepiny, její krycí vlastnosti a v neposlední řadě také její životnost. V případech, kdy je kontrola suspenze zanedbána se zvyšuje riziko vad skořepiny a z tohoto důvodu vznikají i vady na odlitcích. Následné odstranění vad zvyšuje výrobní náklady. Řízením konstantních vlastností břechky je možné ušetřit výrobní náklady se kterými je spojena i konečná cena odlitku, která tak může být nižší a slévárna může být na trhu konkurenceschopnější.

### 2.3.1 Kontrola teploty

Kontrola teploty je zásadní při udržení stálých vlastností keramické suspenze. S rostoucí teplotou dochází k poklesu viskozity a tím ke zhoršení krycích vlastností suspenze. Vyšší teplota má také za následek větší odpařování vody, což může vést až ke gelaci pojiva. K udržení permanentních vlastností by neměla teplota kolísat více než  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Kritická hodnota teploty se pohybuje v rozmezí  $24\text{--}28^\circ\text{C}$  v závislosti na typu použitého pojiva a nemělo by dojít k jejímu překročení.

Měření teploty patří k nejjednodušším způsobům testování keramické suspenze a provádí se pomocí teploměru, který se ponoří do břechky.

### 2.3.2 Kontrola viskozity

Viskozita je veličina, která charakterizuje vnitřní tření kapaliny, její průtokové vlastnosti, a přímo ovlivňuje krycí schopnost břechky. Keramická suspenze s optimální viskozitou by měla zajistit dokonalé pokrytí voskového stromečku a rovnoměrnou tloušťku nabalené vrstvy. Viskozita keramické suspenze je dána jejím složením.

K měření viskozity jsou používány dva typy zkušebních pohárků (Zahnův nebo Fordův) s různou velikostí výstupního otvoru. Měření probíhá tak, že se do zkušebního pohárku nabere keramická suspenze a jsou spuštěny stopky, pomocí kterých se měří doba výtoku břechky z pohárku. Čas se měří buďto do doby, kdy dojde k přerušení plynulosti proudění nebo jakmile se při pohledu shora objeví otvor ve dně pohárku.



Obr. 18 Zahnův pohárek [16]



Obr. 19 Fordův pohárek [17]

### 2.3.3 Kontrola pH

Hodnota pH je číslo, které vyjadřuje, zda roztok reaguje zásaditě (alkalicky) nebo naopak kyselé. Rozsah hodnot na stupnici pH je od 0 do 14, přičemž neutrální voda má pH rovno 7. Hodnoty pH od 0 do 7 značí kyselý roztok (s klesající hodnotou stoupá kyselost roztoku) a hodnoty pH vyšší než 7 označují roztoky zásadité (čím vyšší číslo, tím silnější zásada).

Důsledkem špatné hodnoty pH je nižší životnost keramické suspenze a negativní ovlivnění pevnosti obalu. S přidáním moučky pH klesá. V případě poklesu pH pod 9 dochází ke gelaci, což může vést k nevratné degradaci pojiva. Hodnoty pH by se měly pohybovat nad 9,4.

Podstatou metody měření pH je velmi přesné měření elektrického potenciálu mezi měrnou a referenční elektrodou. Základní částí elektrody je tenkostěnná baňka, jejíž vnitřní objem je naplněn roztokem o konstantním pH. Elektroda je ponořena do zkoušeného roztoku a ionty na povrchu skla způsobí změnu elektrického potenciálu elektrody, který je zaznamenán voltmetrem. Napětí na voltmetru je poté převedeno na hodnotu pH.

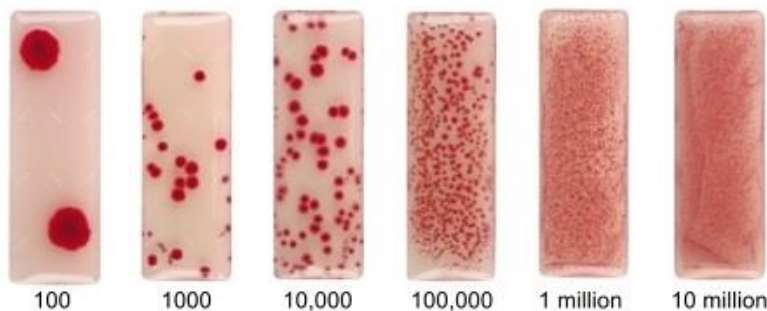


Obr. 20 pH metr [18]

### 2.3.4 Kontrola množství bakterií

Bakterie se živí polymerními složkami a vylučují kyselé látky, které způsobují pokles pH a tím nepříznivě ovlivňují vlastnosti skořepiny. Pokud je kontrola bakterií zanedbávána, může dojít k jejich přemnožení a k degradaci břečky. Výskyt bakterií v keramické suspenzi negativně ovlivňuje životnost břečky a může zapříčinit zhoršení vlastností skořepiny. Ve velmi vážných případech přemnožení bakterií je cítit silný zápach.

V prvním kroku je třeba separovat záruvzdorný materiál od samotného pojiva. To se provádí odstředěním nebo usazováním ve vysoké štíhlé nádobce. Poté se do odseparovaného pojiva namočí speciální živný pásek, který slouží k rychlejšímu růstu bakterií. Živný pásek se uzavře do nádobky, kde dochází k inkubaci za pokojové nebo zvýšené teploty. Po uplynutí doby inkubace se vzorek vyhodnotí dle etalonů.



Obr. 21 Vyhodnocení vzorku dle etalonů [19]

### 2.3.5 Kontrola hustoty

Celková hustota keramické suspenze je dána obsahem jednotlivých komponent obsažených v břečce. Nízká hustota znamená, že je v břečce obsažen malý podíl pevných žáruvzdorných látek. Na nízkou hustotu má vliv také vzduch v břečce. Naopak vysoká hustota břečky je způsobena velkým obsahem žáruvzdorných látek.

Při testování je nejprve zvážena prázdný odměrný válec. Následně je naplněn keramickou suspenzí o objemu 100 ml a znovu zvážena. Od hmotnosti odměrného válce se suspenzí je odečtena hmotnost prázdného válce a výsledná hodnota se podělí stem. Takto je vypočtena celková hustota keramické břečky.

### 2.3.6 Test obsahu žáruvzdorných látek (Drying test)

Test slouží ke stanovení množství žáruvzdornin v keramické břečce. Hliníková miska je nejdříve zvážena a pak je do misky nalit vzorek keramické suspenze. Miska spolu s odebraným vzorkem suspenze je opět zvážena. Poté je vzorek vysušen v peci a znovu zvážena. Rozdíl hmotností před a po sušení udává obsah žáruvzdorných látek v keramické suspenzi.

### 2.3.7 Destičková zkouška (Plate weight test)

Destičková zkouška slouží k určování schopnosti břečky dokonale pokrýt voskový model. Zkouška se provádí u břeček určených pro primární obaly, které musí zajistit optimální tloušťku nabalené vrstvy. Krycí schopnost keramické suspenze závisí především na její viskozitě a na velikosti žáruvzdorných částic.

Měření nabalené vrstvy je prováděno vážením. Plátek plechu čtvercového tvaru z bronzu či mosazi o rozměrech 150 x 150 mm nebo 75 x 75 mm, který je řádně očištěný a vysušený je zvážena a váha se vynuluje. Poté je plátek ponořen do odebraného vzorku keramické suspenze tak, aby byl pokrytý celý jeho povrch. Je třeba dbát na to, aby vzorek břečky byl odebrán až těsně před samotným ponořením plátku a nedocházelo ke změně jeho vlastností vlivem delšího odstátí. Doba ponoření vzorku do suspenze by měla být při každém měření stejná. Ihned po vytažení plátku plechu z břečky se spouští stopky a plátek je zavěšen na váhu. Keramická suspenze stéká z plátku a hmotnost nabalené vrstvy s časem klesá. Hodnoty se zapisují v intervalu 15 sekund po dobu tří minut. Pokud však dojde k naměření tří stejných hodnot po sobě jdoucích, může být měření přerušeno dříve. Z naměřených hodnot získáme křivku závislosti množství nabalené vrstvy v čase.



Obr. 22 Destičková zkouška

### 2.3.8 Kontrola smáčivosti (Wetting test)

Kontrola smáčivosti je prováděna u keramických suspenzí určených pro primární obal. Pokud je smáčivost suspenze dobrá, znamená to, že při obalování dojde k dobrému vyplnění špatně dostupných míst na voskovém modelu složitého tvaru.

K zjišťování smáčivosti keramické suspenze je používán povoskovaný kelímek, případně voskový model, který se ponoří do břečky a následně se nechá okapat a uschnout. Krycí vrstva by měla držet ostrou linii (jasně daný okraj) a neměla by se trhat.



Obr. 23 Dobrá smáčivost (vlevo) a špatná smáčivost (vpravo) [15]

### 2.3.9 Odpěňovací test (Antifoam test)

Odpěňovací přísada v keramické suspenzi slouží k odstranění vzduchových bublinek, jejichž výskyt je v suspenzi nežádoucí a může být příčinou praskání skořepin. Antifoam test slouží k určení účinnosti odpěňovací přísady.

Při testování je nutné nejprve odseparovat pojivo od žáruvzdorného materiálu odstředěním nebo usazením ve vysoké štíhlé nádobce. Pojivo se naleje do zkumavky tak, aby dosahovalo zhruba do jedné třetiny. Zkumavkou se intenzivně třese po dobu pěti sekund, což má za následek vznik pěny. Pokud odpěňovací přísada funguje správně, měla by vzniklá pěna do 20 sekund zmizet.



Obr. 24 Odpěňovací test [15]

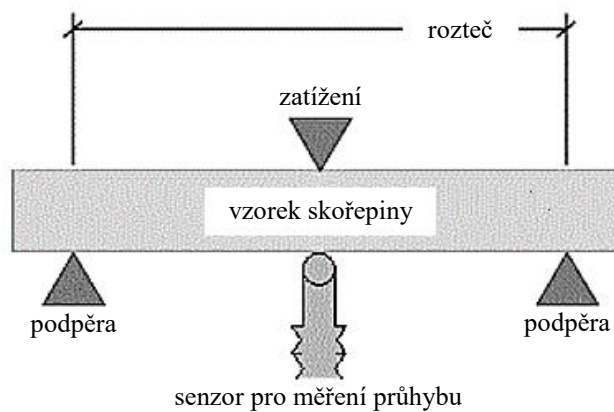
## 2.4 Zkoušení keramické skořepiny [3, 6, 8, 20, 21]

Zkoušením keramických skořepin jsou zjišťovány parametry jako modul pevnosti v ohybu, prodyšnost skořepin nebo tepelná roztažnost. Tyto vlastnosti jsou ovlivňovány použitými materiály, ze kterých je keramická skořepina zhotovena a hrají důležitou roli ve výrobě odlitků litých do skořepinových forem.

### 2.4.1 Pevnost v ohybu (MOR)

Modul pevnosti v ohybu (MOR, z anglického modulus of rupture) patří mezi základní pevnostní charakteristiky keramických forem. Dosud nejběžnější zkouška zjišťování pevnosti skořepin je lámací zkouška, při které je zkušební těleso ve tvaru destičky. Tyto destičky se připravují opakovaným nanášením obalové hmoty na voskový model. Poté se voskový model odstraní vytavením.

U zkušebních vzorků je potřeba nejprve změřit jejich rozměry. Vzorek skořepiny je umístěn na dvě podpory o dané rozteči primárním obalem dolů a následně je zatěžován přesně uprostřed rozteče. Měří se nejenom maximální zatížení, kdy dojde k prasknutí vzorku, ale také průhyb zkušebního vzorku v závislosti na působící síle. Měření průhybu je důležité především u nevyžíhaného vzorku (za syrova), protože při vytavování voskového modelu ze skořepiny dochází vlivem teplotní roztažnosti vosku k namáhání formy, která ještě není vyžihána a u nedostatečně pružné formy by mohlo dojít k jejímu popraskání.



Obr. 25 Schéma zatěžování vzorku [6]

Pevnost v ohybu se měří u tří stavů skořepin:

- Pevnost za syrova**, která udává schopnost odolat porušení skořepiny při manipulaci s obaleným stromečkem a také při samotném vytavování vosku.
- Pevnost za tepla** označuje schopnost skořepiny odolat vlivům při odlévání.
- Pevnost po vyžihání** a následném ochlazení na pokojovou teplotu udává, jakou pevnost bude mít skořepina po odlití, a tedy jak snadno půjde odstranit.



Z naměřených hodnot je poté vypočten modul pevnosti podle vzorce:

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

MOR – pevnost v ohybu [N / mm<sup>2</sup>],

F – síla potřebná ke zlomení zkušební vzorku [N],

l – vzdálenost podpěr [mm],

b – šířka zkušební vzorku [mm],

h – tloušťka zkušební vzorku [mm].

### 2.4.2 Prodyšnost

Schopnost skořepiny propouštět plyny neboli prodyšnost patří mezi stěžejní vlastnosti keramické formy. Malá prodyšnost formy negativně ovlivňuje zaběhnutí kovu do míst, ze kterých nemůže plyn skrze formu uniknout. Prodyšnost skořepiny závisí na množství pórů a na tom, jak jsou vzájemně propojeny. Obecně platí, že ostrohranná ostřiva mají lepší prodyšnost než ostřiva kulového tvaru.

Zkušební tělísko pro měření prodyšnosti vznikne tak, že je k pingpongovému míčku připevněna keramická trubička. Míček s částí trubičky je obalen keramikou a vyžihán. V žihací peci dojde k vyhoření pingpongového míčku. Na trubičku je připojen kompresor a měří se hodnoty průtoku vzduchu skořepinou. Měření prodyšnosti se provádí za různých teplot.



Obr. 26 Obalené pingpongové míčky [22]

### 2.4.3 Teplotní roztažnost (DIL)

Teplotní roztažnost keramického materiálu je velmi důležitou charakteristikou, protože objemové změny skořepiny mohou být příčinou popraskání forem. Rozměrová nestabilita forem v důsledku tepelného působení může ovlivnit také výsledné rozměry odlitku. Teplotní roztažnost závisí především na použitém žáruvzdorném materiálu.

Zkušební vzorek ve tvaru malého hranolu je umístěn do keramické trubičky a přitlačen keramickým pístem. Vzorek je zasunut do pece s naprogramovanou rychlostí ohřevu na danou teplotu, které je potřeba dosáhnout. Hodnoty roztažnosti vzorku skořepiny jsou zaznamenávány v určitém intervalu pomocí dilatometru. Počítačový software tato data zpracuje a vykreslí křivku závislosti roztažnosti skořepiny na teplotě.

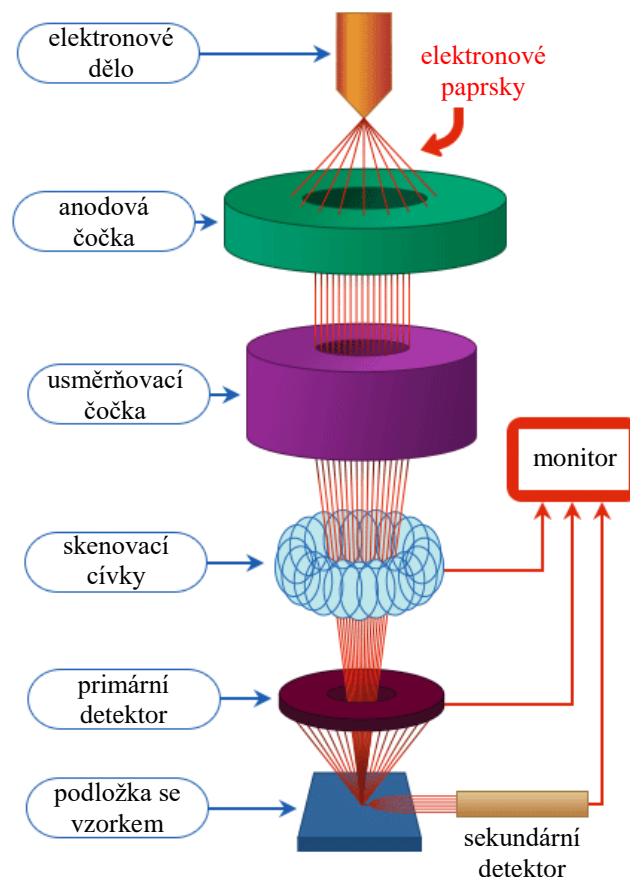


Obr. 27 Dilatometr [23]

### 2.4.4 Spektrální elektronová mikroskopie (SEM)

Spektrální elektronová mikroskopie slouží ke zhodnocení struktury skořepiny pomocí elektronového mikroskopu, který je obdobou světelného mikroskopu s tím rozdílem, že k pozorování se nepoužívají fotony, ale svazek elektronů dopadajících na vzorek. K fokusaci paprsku elektronů slouží elektromagnetické čočky, které vytváří magnetické pole. Výhodou elektronového mikroskopu je jeho lepší rozlišovací schopnost, která je úměrná vlnové délce použitého záření. Elektrony mají mnohem kratší vlnovou délku než viditelné světlo, a tudíž elektronový mikroskop dosahuje podstatně vyššího efektivního zvětšení než světelný mikroskop.

Nejprve je třeba oddělení vzorků z určených míst skořepinové formy. Poté jsou vzorky zalisovány do akrylové pryskyřice a vybroušeny. Takto připravené vzorky jsou umístěny do elektronového mikroskopu a hodnotíme jejich strukturu.



Obr. 28 Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu [24]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem práce je porovnání dvou navrhovaných variant složení keramické skořepiny se současným obalovacím systémem ve slévárně Alucast, s.r.o. Výsledkem by mělo být doporučení pro volbu nejvhodnějšího složení, které nahradí stávající obalovací systém.

V experimentální části jsou uvedeny parametry dvou navrhovaných variant složení keramické skořepiny, které se liší pouze v použité moučce pro primární obal. Jednotlivé varianty jsou porovnány na základě provedených zkoušek a také na základě ekonomického hlediska. Je zde rovněž popsáno složení skořepiny, které je nyní používáno pro ruční obalování ve firmě Alucast, s.r.o. a současné metody testování keramických suspenzí v provozu.

Závěrem je v této práci uvedeno doporučení pro zlepšení stávajícího stavu týkajícího se procesu výroby keramických skořepin ve firmě Alucast, s.r.o.



Obr. 29 Firma Alucast, s.r.o. [25]

#### 3.1 Současný stav

V současnosti je pro primární obaly používána moučka Zeta Flour Calcined 200, což je moučka na bázi zirkonu. Jak je popsáno v teoretické části této práce, zirkonový materiál má svou nevýhodu v jeho ceně, a proto je snaha jej nahradit levnějším, avšak vyhovujícím materiálem. Obalování probíhá dvěma různými způsoby. Verze ALC-A – 4 různé obaly (1, 2, 3, 4, 4) a verze ALC-B – 3 různé obaly (1, 2, 2, 4, 4).

Příprava keramické suspenze se nyní provádí dle potřeby tak, že se do tanku doplní pouze spotřebované množství materiálu, tzn. že na přípravu břečky a pro obalování je využívána stejná nádoba. Takový způsob přípravy je nevhodný z hlediska nedostatečného času pro stabilizaci břečky a může docházet ke kvalitativním změnám skořepin během dne.

Proces kontroly keramické suspenze je v současnosti založen pouze na měření viskozity. Žádné další testování keramické suspenze ve firmě Alucast, s.r.o. neprobíhá.



### 3.2 Robotické pracoviště

Důvodem investice do robotizovaného pracoviště je zvýšení efektivity a produkce výroby skořepinových forem a také možnost výroby rozměrných odlitků, jejichž výroba je na ručním pracovišti nevhodná z důvodu velké hmotnosti. Robotické pracoviště s sebou přináší také výhody při kontrole procesu výroby keramických skořepin, protože lze s procesem vyloučit chyby způsobené lidským faktorem. Ve stávajících podmínkách ručního pracoviště je možné vyrábět odlitky maximální velikosti  $500 \times 300 \times 200$  mm. Na robotickém pracovišti bude možné vyrábět odlitky o rozměrech až  $900 \times 400 \times 300$  mm. Také výkonnost robota bude nesrovnatelně vyšší, jelikož může uchopit svým ramenem až šest stromečků naráz. Robotické pracoviště bude vybaveno jedním robotickým ramenem, třemi tanky na keramickou břečku, třemi stanovišti pro sprchový posyp ostřivem a sušicí linkou. Příprava keramické suspenze bude prováděna v samostatných tancích, což je rozdíl oproti dosavadnímu stavu, kdy se na míchání a obalování používá stejná nádoba. Robotické pracoviště je zobrazeno na obr. 30.



Obr. 30 Robotické pracoviště ve firmě Alucast, s.r.o.

### 3.3 Navrhovaná složení obalovacího systému

Pro nahrazení současného obalovacího systému jsou navrženy dvě varianty. Obě varianty se liší pouze v použité moučce pro primární obal. Všechny ostatní složky jsou pro obě varianty totožné. Níže jsou detailněji popsány jednotlivé složky obalovacích systémů obou variant.

### 3.3.1 Varianta 1

Moučka použitá na první obal u varianty 1 je Mulgrain 60–325, což je aluminosilikátový žáruvzdorný materiál. Pro druhý a třetí obal je stejné složení břečky a je také stejný posypový materiál. Totéž platí pro čtvrtý a pátý obal. To znamená, že pro obalovací systém je třeba tří druhů keramických suspenzí a tří druhů posypového žáruvzdorného materiálu. Kompletní složení varianty 1 je popsáno v tabulce 4.

Tab. 4 Složení varianty 1

<b>Varianta 1</b>				
		<b>1. obal</b>	<b>2. + 3. obal</b>	<b>4. + 5. obal</b>
<b>břečka</b>	<b>pojivo</b>	Primcote PLUS	Matrixsol 30	Matrixsol 30
	<b>moučka</b>	<b>Mulgrain 60–325</b>	Molochit 120	Molochit 120
	<b>aditiva</b>		MXC Excel Concentrate	MXC Excel X2 Blend
	<b>další</b>		Destilovaná voda	Destilovaná voda
<b>posyp</b>		Molochit 50–80	Molochit 30–80	Molochit 16–30

### 3.3.2 Varianta 2

Varianta 2 se odlišuje jen v použité moučce. Moučka varianty 2 je na bázi taveného oxidu hlinitého a její název je WRG IC ESM. Druhý až pátý obal je zcela totožný s variantou 1. Celé složení varianty 2 je v tabulce 5.

Tab. 5 Složení varianty 2

<b>Varianta 2</b>				
		<b>1. obal</b>	<b>2. + 3. obal</b>	<b>4. + 5. obal</b>
<b>břečka</b>	<b>pojivo</b>	Primcote PLUS	Matrixsol 30	Matrixsol 30
	<b>moučka</b>	<b>WRG IC ESM</b>	Molochit 120	Molochit 120
	<b>aditiva</b>		MXC Excel Concentrate	MXC Excel X2 Blend
	<b>další</b>		Destilovaná voda	Destilovaná voda
<b>posyp</b>		Molochit 50–80	Molochit 30–80	Molochit 16–30

### 3.4 Popis jednotlivých komponent [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32]

Tato kapitola se zabývá detailnějším popisem jednotlivých komponent (pojivo, aditivum, moučka a ostřívo) použitých jak pro variantu 1, tak pro variantu 2.

**Primcote PLUS** je pojivo určené pro primární obaly. Toto pojivo již obsahuje smáčedlo, odpěňovací činidlo a barevný indikátor, který značí vysušení obalu. Výrobce uvádí, že v porovnání s nevylepšeným pojivem Primcote se zvýšila životnost primární břechky o 60 % a pojivo Primcote PLUS má také lepší smáčecí schopnosti. Samozřejmostí je kompatibilita s běžně používanými žáruvzdornými materiály.

Materiálové vlastnosti pojiva Primcote PLUS:

- Obsah pevných látek: 28,5–30 %
- Velikost částic: <15 nm
- pH: 10,3
- Hustota: 1170 kg/m<sup>3</sup>

**Matrixsol 30** je pojivo, které je navrženo na veškeré další (ne na primární) obaly. Obsahuje přibližně 30 % pevných částic oxidu křemičitého.

Materiálové vlastnosti pojiva Matrixsol 30:

- Obsah pevných látek SiO<sub>2</sub>: 30 %
- pH: 10,5
- Hustota: 1200 kg/m<sup>3</sup>

**MXC Excel Contretrate** je koncentrát obsahující latex, povrchově aktivní látky a biocid. Biocid je látka používaná k hubení a omezení růstu bakterií. MXC Excel Contretrate neobsahuje žádné vlákna a je navrženo pro druhý a třetí obal u obou variant.

Materiálové vlastnosti aditiva MXC Excel Concentrate:

- Obsah pevných látek: 48,9–50 %
- pH: 8,5–9,5
- Hustota: 1040 kg/m<sup>3</sup>

**MXC Excel X2 Blend** je aditivum navržené pro použití u čtvrtého a pátého obalu. Obsahuje latex, povrchově aktivní látky, biocid a také vlákna, která zvyšují pevnost obalu a minimalizuje se tak porušení skořepiny při vytavování vosku. Aditivum MXC Excel X2 Blend by mělo zajistit vynikající pokrytí i na ostrých hranách tvarově složitých odlitků.

Materiálové vlastnosti aditiva MXC Excel Concentrate:

- Obsah pevných látek: 48,9–50 %
- pH: 8,5–9,5
- Hustota: 1040 kg/m<sup>3</sup>

Moučka navržená pro primární obal varianty 1 je **Mulgrain 60** – 325. To je velmi jemná mullitová moučka se zrnitostí 0,045 mm, jejíž chemické složení popisuje tabulka 6.

Tab. 6 Chemické složení moučky Mulgrain 60

<b>Mulgrain 60</b>	
<b>Druh oxidu</b>	<b>Obsah [%]</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,6
SiO <sub>2</sub>	37,8
TiO <sub>2</sub>	2,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1
CaO	0,06
MgO	0,07
Na <sub>2</sub> O	0,07
K <sub>2</sub> O	0,04

U varianty 2 je jako moučka pro keramickou břечku prvního obalu navržena **WRG IC ESM**, která je z majoritní části složena z oxidu hlinitého a vyrábí se tavením kalcinovaného oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a vysoce čistého křemene (SiO<sub>2</sub>) v elektrické obloukové peci při zhruba 2000 °C. Tato moučka je díky nízkému obsahu nečistot vysoce stabilní. Střední průměr zrna je 0,027 mm. Přesné složení je uvedeno v tabulce 7.

Tab. 7 Chemické složení moučky WRG IC ESM

<b>WRG IC ESM</b>	
<b>Druh oxidu</b>	<b>Obsah [%]</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	83,5
SiO <sub>2</sub>	16
Na <sub>2</sub> O	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05

Pro 2. a další obaly je navržena moučka **molochit 120**, která má velikost zrn do 0,125 mm.

Posypovým materiál pro všechny vrstvy je molochit o různých zrnitostech. Tabulka 8 popisuje chemické složení molochitových ostřiv. V tabulce 9 jsou uvedeny typy posypů a jejich zrnitost pro jednotlivé obaly.

Tab. 8 Chemické složení molochitového ostřiva

<b>Molochit</b>	
<b>Druh oxidu</b>	<b>Obsah [%]</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42
SiO <sub>2</sub>	54
K <sub>2</sub> O	2
MgO	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,3
TiO <sub>2</sub>	0,07
CaO	0,07

Tab. 9 Posypový materiál a jeho zrnitost

	<b>1. obal</b>	<b>2. + 3. obal</b>	<b>4. + 5. obal</b>
<b>Posyp</b>	Molochit 50–80	Molochit 30–80	Molochit 16–30
<b>Zrnitost [mm]</b>	0,18–0,3	0,18–0,5	0,5–1

### 3.5 Výroba keramických skořepin

Voskové stromečky byly vyrobeny ve firmě Alucast a převezeny do laboratoře Imerys Technology Center v Rakouském Villachu, kde byly již předem namíchány všechny tři druhy keramických břeček. Jedna sada stromečků byla určena pro výrobu vzorků na testy pevnosti v ohybu a druhá sada se skládala z konkrétního odlitku, který je již v Alucastu vyráběn. Do těchto skořepin byl později nalit tekutý kov a byly z nich vyřezány vzorky pro rozbor struktury pomocí elektronového mikroskopu. Další sada stromečků byla obalena současným obalovacím systémem ve firmě Alucast. Také obalení pingpongových míčků pro test prodyšnosti probíhalo jak ve Villachu (2 navrhované varianty), tak přímo ve slévárně Alucast (současný obalovací systém). Všechny stromečky určené k testování byly převezeny zpět do Alucastu a byl z nich vytaven vosk. Poté se vzorky odeslaly zpět do laboratoře Imerys Technology Center, kde byly provedeny veškeré testy.

### 3.5.1 Voskové modely

Voskový model reálného odlitku má rozměry zhruba  $200 \times 200 \times 150$  mm bez vtokové soustavy a je zobrazen na obr. 31. Voskový model chladiče se žebry jako zástupce velmi tvarově složitého odlitku je na obr. 32 a voskový model pro výrobu vzorků na zkoušku pevnosti v ohybu je na obr. 33.



Obr. 31 Voskový model reálného odlitku





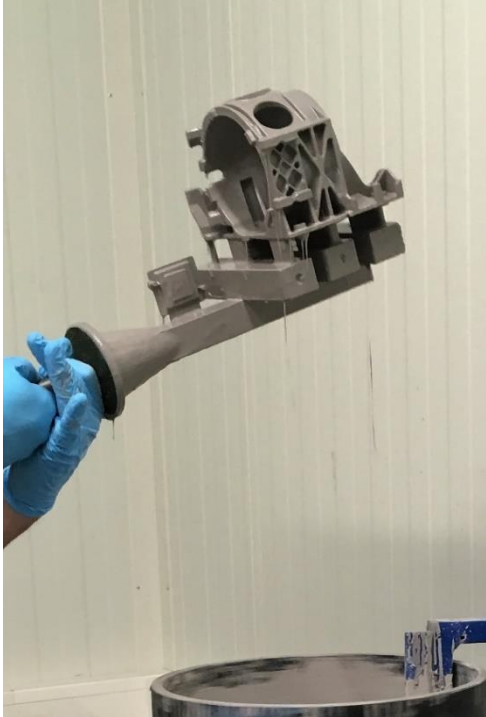
Obr. 32 Voskový model chladiče



Obr. 33 Voskový model pro výrobu vzorků na zkoušku pevnosti v ohybu

### 3.5.2 Obalení keramikou

Na obrázcích 34 a 35 je vidět vznik první vrstvy skořepiny čili obalení keramickou suspenzí a posypání jemným žáruvzdorným ostřivem. Obrázky 36 a 37 zobrazují již obalený voskový stromeček a detail chladiče, který má za úkol reprezentovat tvarově velmi složitý odlitek.



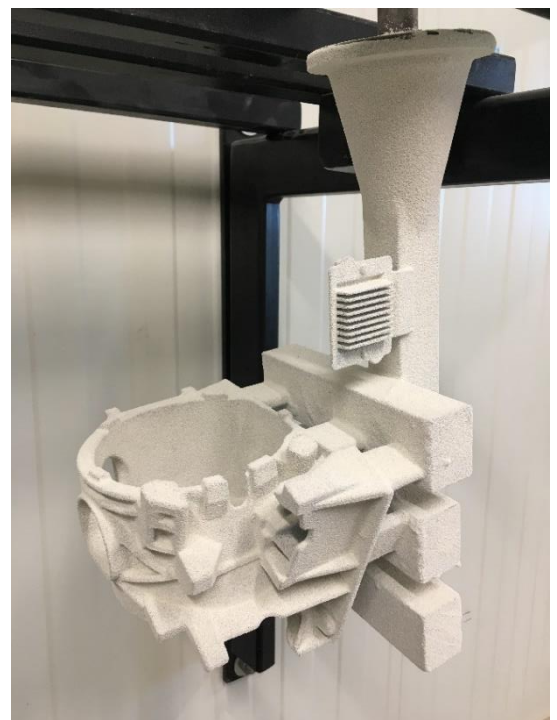
Obr. 34 Obalení břechkou



Obr. 35 Posypání ostřivem



Obr. 36 Detail první vrstvy



Obr. 37 První vrstva



Druhý obal je posypán hrubším ostřivem, což je jasně patrné z obrázků. Jemné detaily začínají mizet a skořepina postupně nabírá na hmotnosti.



Obr. 38 Detail druhé vrstvy



Obr. 39 Druhá vrstva

Se třetí vrstvou zmizely detaily chladiče úplně. Složení keramické suspenze se nijak neliší od předchozí vrstvy a zrnitost pospyu zůstala také stejná.



Obr. 40 Detail třetí vrstvy



Obr. 41 Třetí vrstva



U čtvrtého obalu je použita břechka obsahující vlákna pro zvýšení pevnosti skořepiny. Posypový materiál je hrubší (zrnitost 0,5–1 mm). Hrubost posypu lze pozorovat na obrázcích. Pro půlku vzorků je čtvrtá vrstva finální.



Obr. 42 Detail čtvrté vrstvy



Obr. 43 Čtvrtá vrstva

Receptura pátého obalu je totožná s recepturou čtvrtého obalu (břechka i ostřívo). Pátou vrstvou byla obalena jenom půlka vzorků. Skořepina s pěti vrstvami je na obr. 44.

Teplota i vlhkost v místnosti při sušení byli hlídány. Teplota v místnosti byla 23, 9 °C a vlhkost byla 48,8 %.



Obr. 44 Hotová skořepina s pěti vrstvami

Měření prodyšnosti se provádí na vzorcích, které vzniknou obalením pingpongových míčků, ke kterým je připevněna dutá keramická tyčinka. Část míčků se obalovala v laboratoři Imerys Technology Center (varianta 1 a varianta 2) a část ve firmě Alucast (varianty A i B stávajícího obalovacího systému). Obalování ve firmě Alucast, od výchozího pingpongového míčku s přilepenou keramickou tyčinkou až po poslední pátý obal, je na obrázcích dále.



Obr. 45 Pingpongový míček s keramickou tyčinkou



Obr. 46 Obalení keramickou břechkou

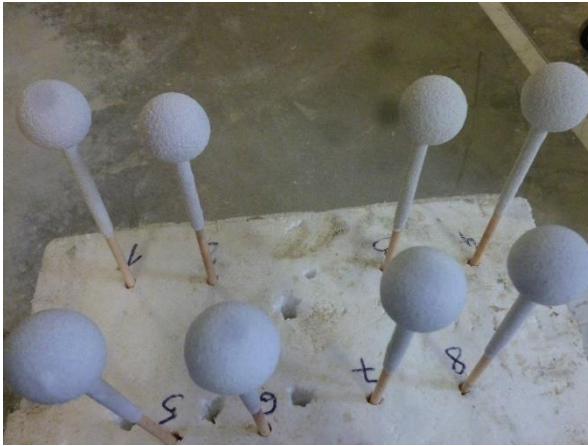


Obr. 47 První obal



Obr. 48 Druhý obal





Obr. 49 Třetí obal



Obr. 51 Pátý obal



Obr. 50 Čtvrtý obal

### 3.6 Testování keramických suspenzí

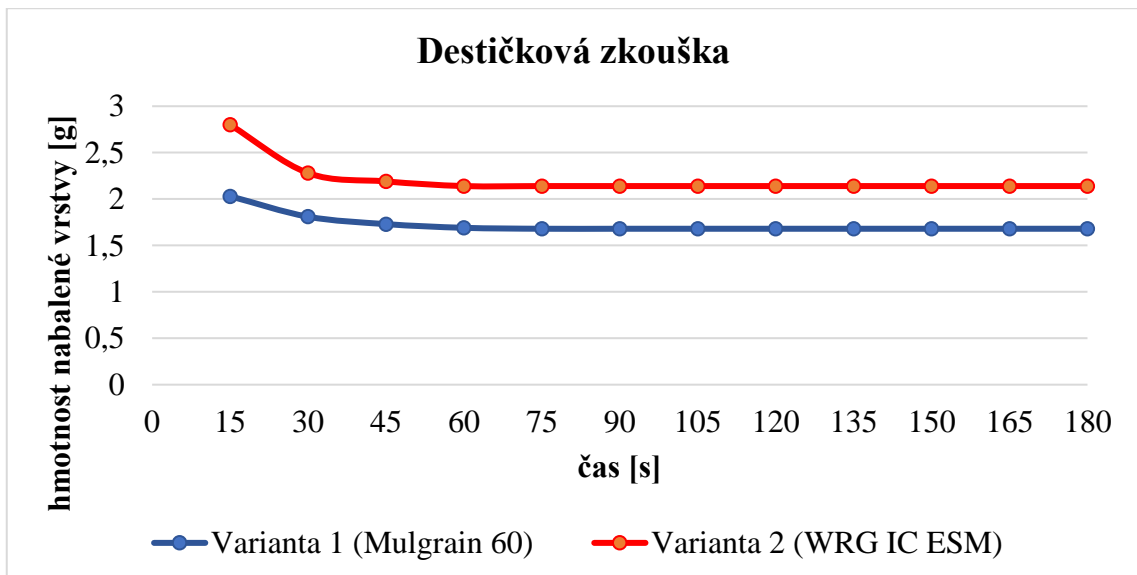
Viskozita primární břečky varianty 1 byla 30 sekund a varianty 2 byla 22,6 sekundy. Porovnání obou variant je pouze na základě destičkové zkoušky.

Destičková zkouška (plate weight test) byla provedena u suspenzí pro primární obal varianty 1 a také pro primární obal varianty 2. Z grafů můžeme vyčíst, že u varianty 1 (moučka Mulgrain 60) se na voskový stromeček nabalí menší množství břečky a stékání trvá delší dobu. Zatímco u varianty 2 čili moučky WRG IC ESM ulpí mohutnější vrstva břečky a stékání se zastaví již po 45 sekundách. Doba stékání je přímo ovlivněna viskozitou keramických suspenzí.

Porovnáním obou variant vidíme, že nabalovací schopnost primárních břeček je rozdílná. Moučka WRG IS ESM se vyznačuje lepší schopností nabalování i přes menší viskozitu ve srovnání s moučkou Mulgrain 60.

Tab. 10 Destičková zkouška

Destičková zkouška		
	Varianta 1 (Mulgrain 60)	Varianta 2 (WRG IC ESM)
Čas [s]	Hmotnost nabalené vrstvy [g]	Hmotnost nabalené vrstvy [g]
15	2,03	2,8
30	1,81	2,28
45	1,73	2,19
60	1,69	2,14
75	1,68	2,14
90	1,68	2,14
105	1,68	2,14
120	1,68	2,14
135	1,68	2,14
150	1,68	2,14
165	1,68	2,14
180	1,68	2,14



Graf 3 Stékání primární keramické břčky pro obě varianty (destičková zkouška)

### 3.7 Zkoušení keramických skořepin

V této kapitole jsou popsány zkoušky keramických skořepin. Byla testována jejich pevnost v ohybu, prodyšnost a také byly zkoumány výbrusy za pomoci elektronového mikroskopu. Pevnost v ohybu byla měřena jak za syrova, tak za zvýšených teplot na vzorcích se čtyřmi a s pěti obaly. Prodyšnost skořepin byla také měřena za různých teplot, konkrétně za pokojové teploty, při 700 °C, 800 °C a 1000 °C. Na výbrusech pak lze pozorovat struktury jednotlivých skořepin.

#### 3.7.1 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu za syrova je významná, protože u skořepinových forem často dochází k jejich popraskání při vytavování vosku, který má větší teplotní roztažnost než keramická forma. Pevnost v ohybu za syrova je u navrhovaných variant téměř stejná. Mírně lépe vychází pevnost pro variantu 2 (WRG IC ESM). Také je patrné, že u varianty 1 vychází lépe pevnost skořepiny se čtyřmi obaly, což je zapříčiněno větší tloušťkou pětivrstvé skořepiny, která hraje ve výpočtu značnou roli. U obalovacího systému ALC–A vychází pevnost v ohybu za syrova stejně jak pro 4 vrstvy, tak pro 5 vrstev. Ve srovnání navrhovaných variant se stávajícím obalovacím systémem vychází pevnost v ohybu za syrova nejlépe pro stávající skořepinu ALC–B.

Tab. 11 Pevnost v ohybu za syrova variant 1 a 2

PEVNOST V OHYBU VARIANT 1 A 2			CMOR (za syrova)	
Označení	Moučka primární břečky	Počet obalů	MOR [Mpa]	Směrodatná odchylka
1M5	Mulgrain 60	5	2,8	0,3
2M4	Mulgrain 60	4	3,3	0,2
3E5	WRG IC ESM	5	3,3	0,6
4E4	WRG IC ESM	4	3	0,4

Tab. 12 Pevnost v ohybu za syrova stávajícího obalovacího systému

PEVNOST V OHYBU ALC SYSTÉMU			CMOR (za syrova)	
Označení	Moučka primární břečky	Počet obalů	MOR [Mpa]	Směrodatná odchylka
5AA	Zeta Flour Calcined	5	3,4	0,3
6AA	Zeta Flour Calcined	4	3,4	0,2
7AB	Zeta Flour Calcined	5	3,7	0,4
8AB	Zeta Flour Calcined	4	4,5	0,3

Pevnost v ohybu se zvyšující se teplotou klesá (skořepina měkne), avšak při teplotě okolo 1000 °C, kdy dojde ke keramizačnímu žhání, pevnost naroste. Z navrhovaných variant dosahuje vyšších pevností v ohybu varianta 2 (WRG IC ESM). Pro stávající obalovací systém je lepší pevnost pětivrstvých skořepin u ALC–B systému a opět je patrná stejná pevnost čtyřvrstvých a pětivrstvých skořepin ALC–A systému.

Tab. 13 Pevnost v ohybu stávajícího obalovacího systému při 700 °C

PEVNOST V OHYBU ALC SYSTÉMU			700 °C	
Označení	Moučka primární břečky	Počet obalů	MOR [Mpa]	Směrodatná odchylka
5AA	Zeta Flour Calcined	5	2,3	0,1
6AA	Zeta Flour Calcined	4	2,3	0,1
7AB	Zeta Flour Calcined	5	3,4	0,4
8AB	Zeta Flour Calcined	4	1,7	0,4

Tab. 14 Pevnost v ohybu variant 1 a 2 při 800 °C

PEVNOST V OHYBU VARIANT 1 A 2			800 °C	
Označení	Moučka primární břečky	Počet obalů	MOR [Mpa]	Směrodatná odchylka
1M5	Mulgrain 60	5	2,3	0,4
2M4	Mulgrain 60	4	2,1	0,1
3E5	WRG IC ESM	5	2,4	0,4
4E4	WRG IC ESM	4	2,8	0,4

Tab. 15 Pevnost v ohybu variant 1 a 2 při 1000 °C

PEVNOST V OHYBU VARIANT 1 A 2			1000 °C	
Označení	Moučka primární břečky	Počet obalů	MOR [Mpa]	Směrodatná odchylka
1M5	Mulgrain 60	5	4,7	0,5
2M4	Mulgrain 60	4	4,2	0,4
3E5	WRG IC ESM	5	5,1	0,5
4E4	WRG IC ESM	4	5,8	0,6



### 3.7.2 Prodyšnost

Měření prodyšnosti bylo provedeno na vzorcích varianty 1, varianty 2 a také na vzorcích aktuálně používaných skořepin (ALC). Prodyšnost se měřila na vzorcích se čtyřmi a s pěti obaly, ale všechny čtyřvrstvé skořepiny obalené aktuálně používaným systémem (ALC) popraskaly ihned při prvním měření, tudíž je pro porovnání uvedena prodyšnost pouze pětivrstevných skořepin. Samozřejmostí je, že skořepina se čtyřmi vrstvami má lepší prodyšnost než pětivrstevná skořepina. Měření probíhalo jak při pokojové teplotě, tak při 700 °C, 800 °C a 1000 °C. Pro měření byly použity tlaky 300 mbar a 500 mbar.

Při pokojové teplotě má nejlepší prodyšnost ALC systém a z navrhovaných nových obalovacích systémů se jako lepší jeví varianta 1 (Mulgrain 60). Porovnáním prodyšností při pokojové teplotě je opravdu značný rozdíl mezi navrhovanými variantami a ALC systémem.

Tab. 16 Prodyšnost při pokojové teplotě

<b>PRODYŠNOST PŘI POKOJOVÉ TEPLITĚ</b>			<b>Tlak 300 mbar</b>	<b>Tlak 500 mbar</b>
<b>Označení</b>	<b>Moučka primární břečky</b>	<b>Počet obalů</b>	<b>Průtok [l/min]</b>	<b>Průtok [l/min]</b>
1M5	Mulgrain 60	5	4,4	6,9
2E5	WRG IC ESM	5	3,4	5,7
3AA	Zeta Flour Calcined	5	6,7	9,9
4AB	Zeta Flour Calcined	5	7	10,2

Prodyšnost při teplotě 700 °C je v našem případě velmi důležitá, jelikož jsou skořepiny určené pro odlévání hliníkových slitin a teplota 700 °C je velmi blízká lící teplotě těchto slitin. Je zřejmé, že oproti měření při pokojové teplotě došlo k razantnímu poklesu prodyšností všech skořepin. Opět je z hlediska prodyšnosti nejlepší stávající varianta používaná v Alucastu a druhá nejlepší je varianta 1.

Tab. 17 Prodyšnost při teplotě 700 °C

PRODYŠNOST PŘI TEPLITĚ 700 °C			Tlak 300 mbar	Tlak 500 mbar
Označení	Moučka primární břečky	Počet obalů	Průtok [l/min]	Průtok [l/min]
1M5	Mulgrain 60	5	1	1,7
2E5	WRG IC ESM	5	0,7	1,3
3AA	Zeta Flour Calcined	5	1,8	3,3
4AB	Zeta Flour Calcined	5	1,7	3

S rostoucí teplotou jsou rozdíly mezi variantou 1 a variantou 2 stále menší. Současný ALC systém obalování má i při teplotě 800 °C nejlepší prodyšnost. A při porovnávání navrhovaných variant je i nadále lepší varianta 1.

Tab. 18 Prodyšnost při teplotě 800 °C

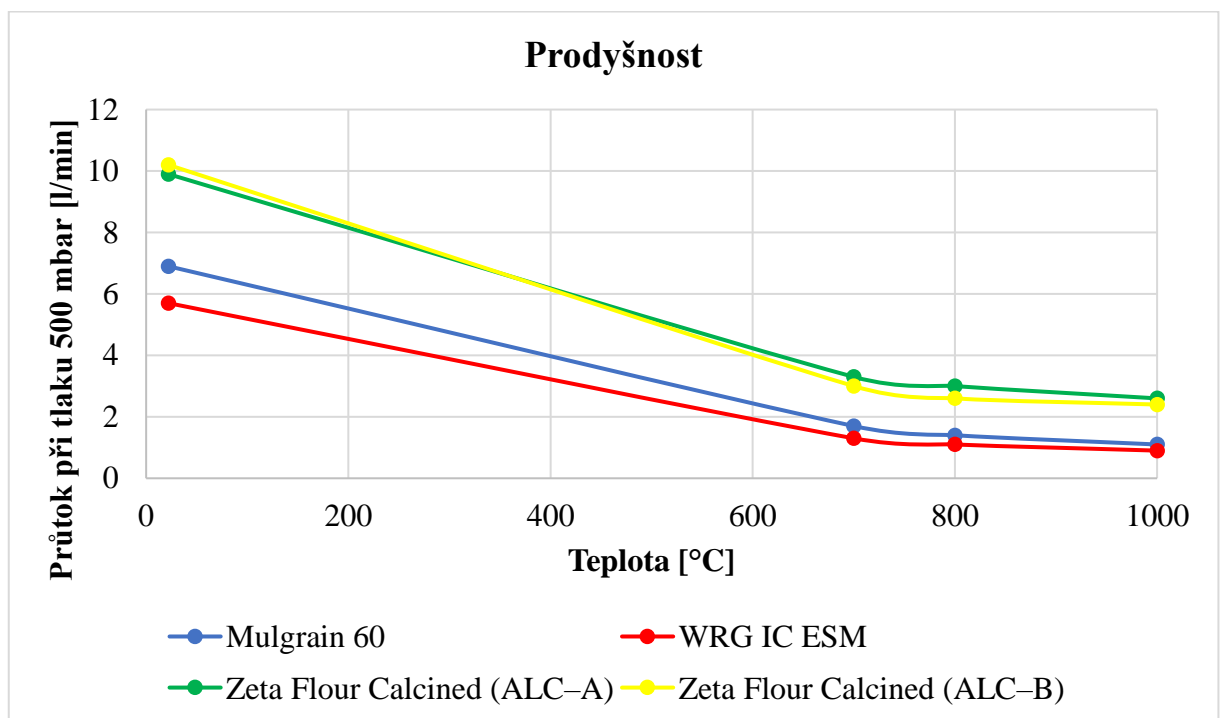
PRODYŠNOST PŘI TEPLITĚ 800 °C			Tlak 300 mbar	Tlak 500 mbar
Označení	Moučka primární břečky	Počet obalů	Průtok [l/min]	Průtok [l/min]
1M5	Mulgrain 60	5	0,8	1,4
2E5	WRG IC ESM	5	0,6	1,1
3AA	Zeta Flour Calcined	5	1,6	3
4AB	Zeta Flour Calcined	5	1,4	2,6

Nejvyšší teplota testování prodyšnosti byla 1000 °C. Tato teplota není příliš významná pro skořepiny určené na odlévání hliníkových slitin. I při této teplotě se jako nejlepší z hlediska prodyšnosti jeví současná ALC skořepina, která dosahuje mnohem lepších hodnot než nově navržené varianty. Prodyšnost při 1000 °C u nově navrhovaných variant je téměř stejná.

Tab. 19 Prodyšnost při teplotě 1000 °C

PRODYŠNOST PŘI TEPLITĚ 1000 °C			Tlak 300 mbar	Tlak 500 mbar
Označení	Moučka primární břečky	Počet obalů	Průtok [l/min]	Průtok [l/min]
1M5	Mulgrain 60	5	0,5	1,1
2E5	WRG IC ESM	5	0,5	0,9
3AA	Zeta Flour Calcined	5	1,4	2,6
4AB	Zeta Flour Calcined	5	1,2	2,4

Z grafu 4 je jasně viditelný pokles prodyšnosti při zvyšování teploty. Nejlepší prodyšnost má stávající (ALC) systém a z navrhovaných variant je mírně lepší varianta 1 (Mulgrain 60).

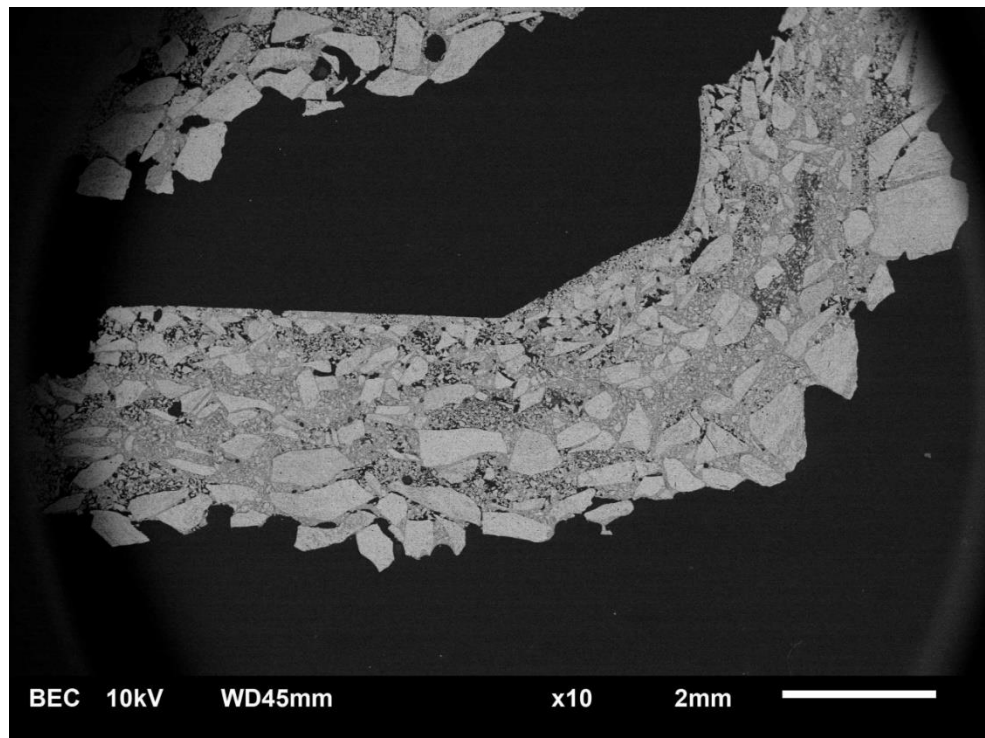


Graf 4 Prodyšnost skořepin při různých teplotách

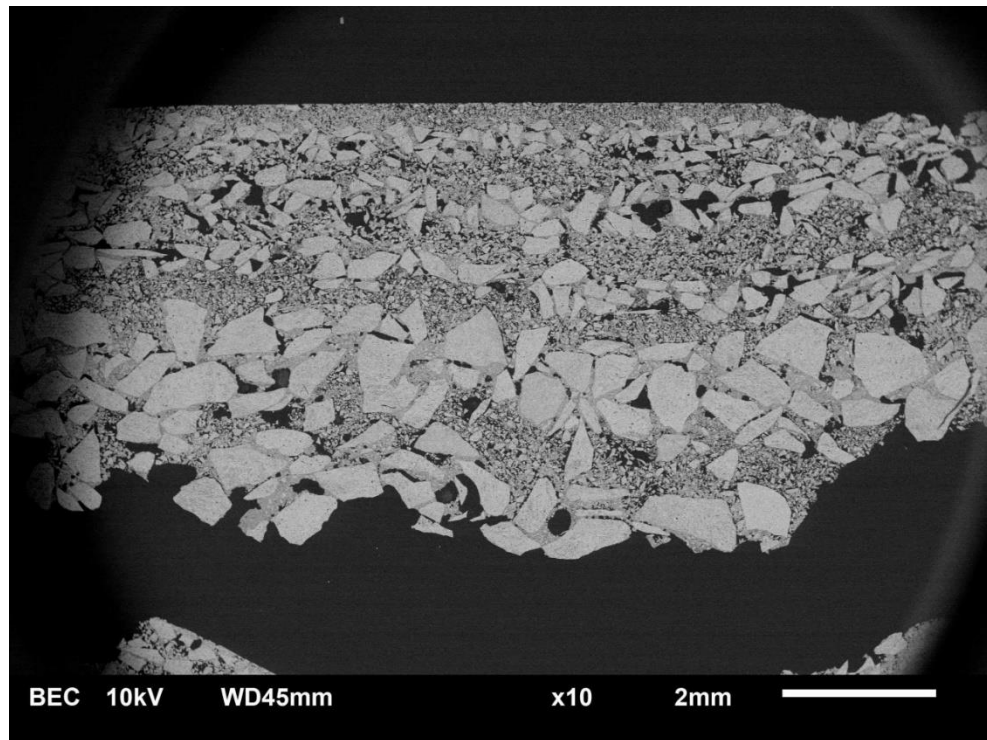
### 3.7.3 Obrazová analýza

V této kapitole je vyhodnocována struktura skořepinových forem. Hodnotí se celkový vzhled, poréznost skořepiny, jednotlivé vrstvy, schopnost keramické suspenze penetrovat mezi zrna ostřiva. Snímky z obrazové analýzy korespondují z dalšími vlastnostmi skořepiny, například lze odhadnout, která skořepina bude mít lepší prodyšnost atd.

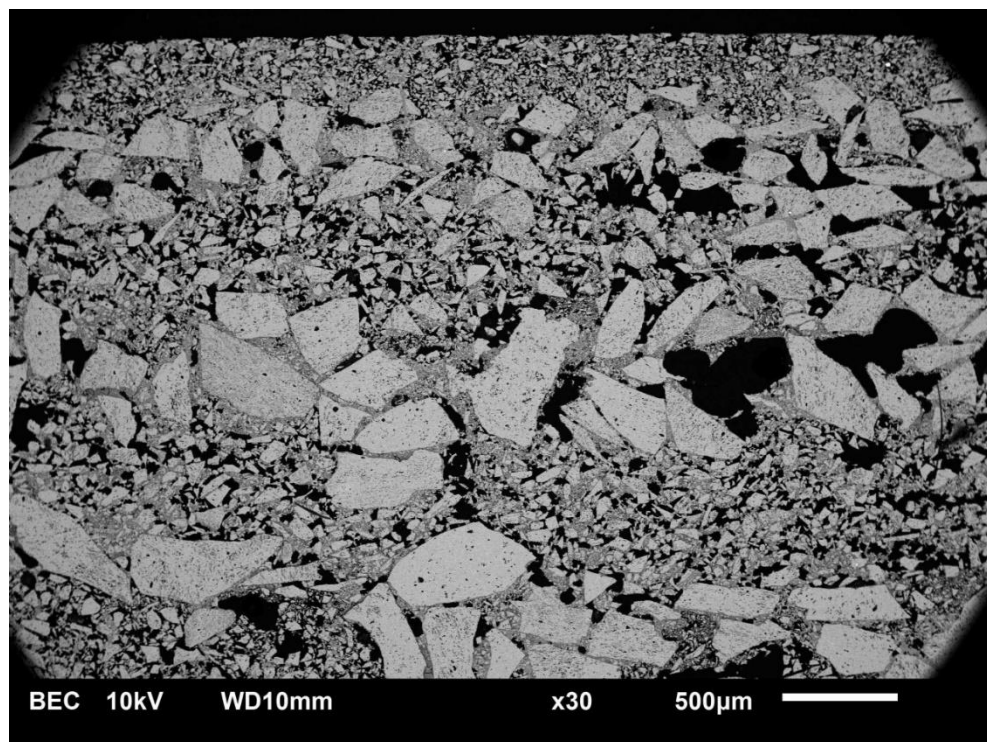
Skořepina varianty 1 (Mulgrain 60) je celistvá a lze rozlišit její jednotlivé vrstvy. Vrstva primární suspenze má dostatečnou tloušťku. Druhá vrstva velmi dobře přilne k primární vrstvě. Keramická suspenze dobře penetruje mezi zrna ostřiva. Skořepina má stejnou tloušťku ve všech místech.



Obr. 52 Obrazová analýza 1 varianty 1

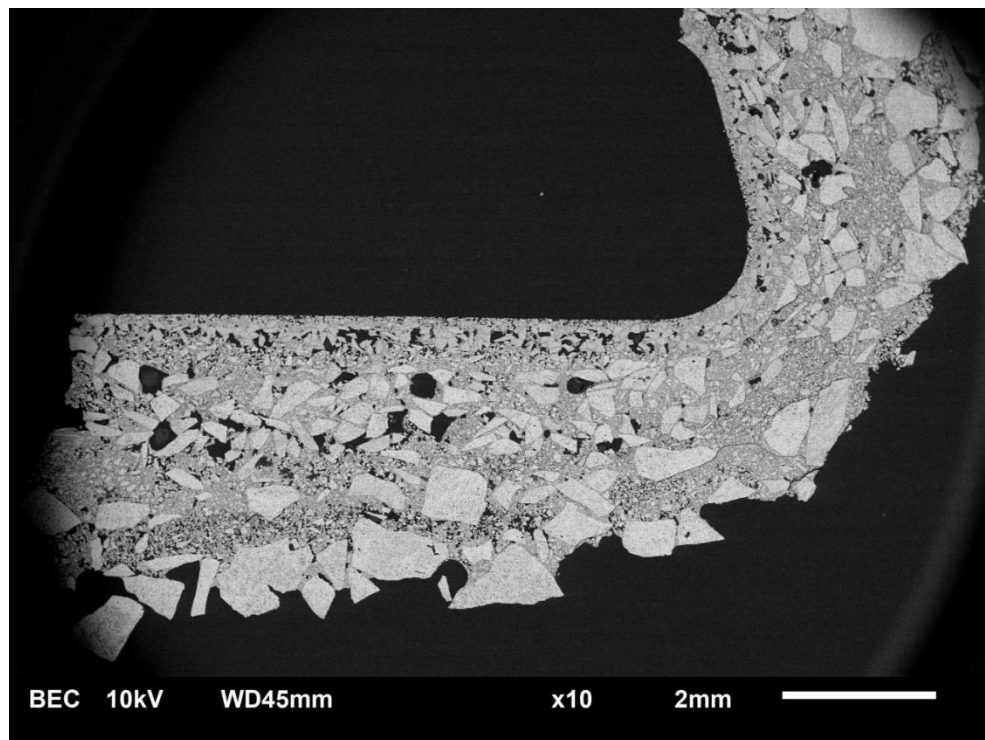


Obr. 53 Obrazová analýza 2 varianty 1

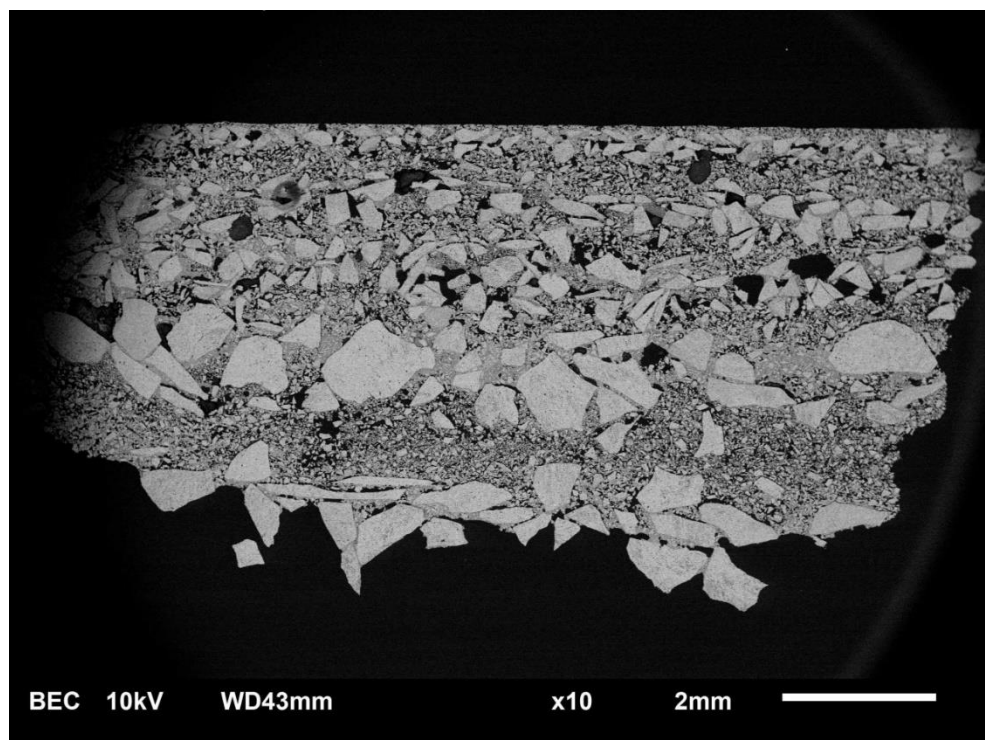


Obr. 54 Obrazová analýza 3 varianty 1

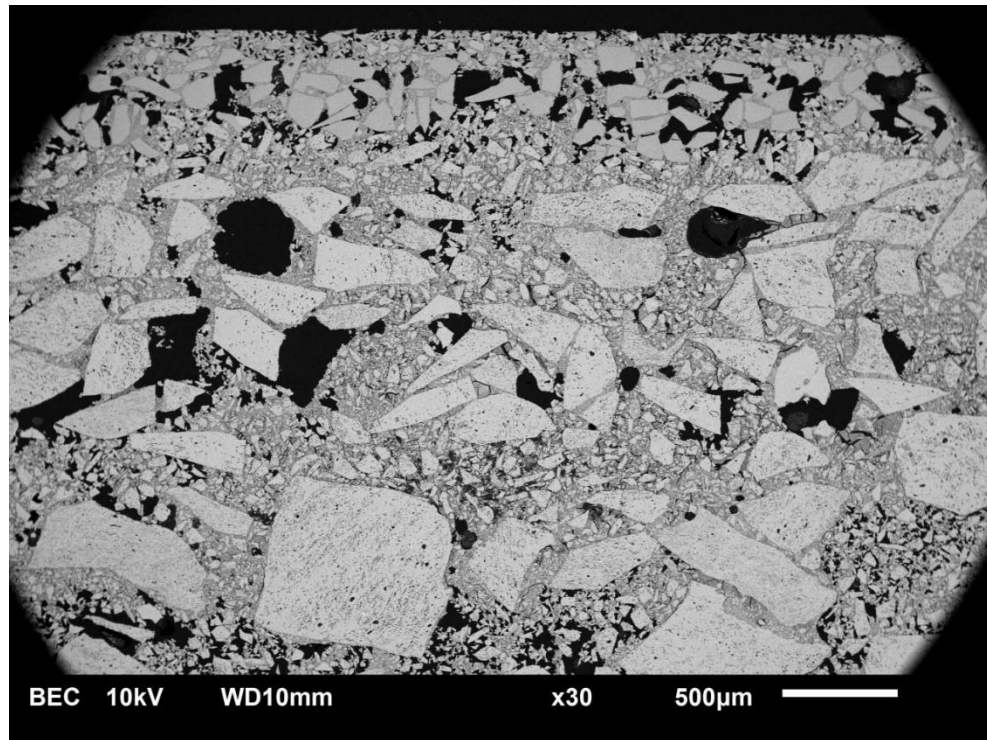
U varianty 2 (WRG IC ESM) je skořepina podobná jako u varianty 1 s tím rozdílem, že břečka druhé vrstvy hůře penetruje mezi zrna ostřiva a přechod mezi vrstvou 1 a 2 je méně celistvý. Tloušťka skořepiny v rozích je menší než tloušťka skořepiny na rovné ploše.



Obr. 55 Obrazová analýza 1 varianty 2

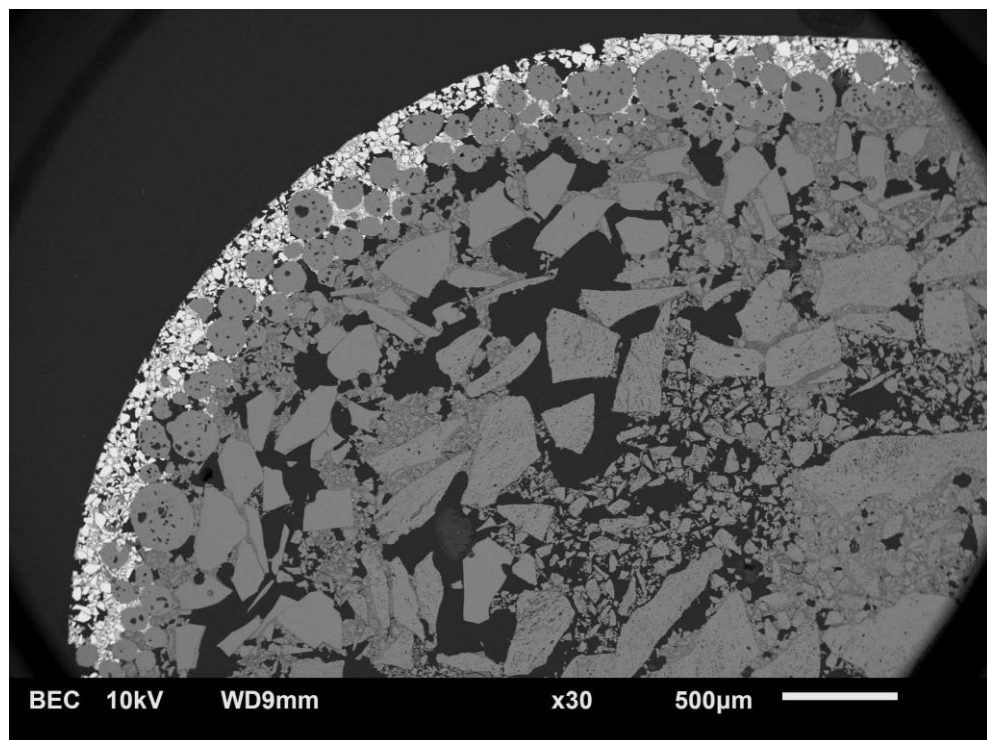


Obr. 56 Obrazová analýza 2 varianty 2



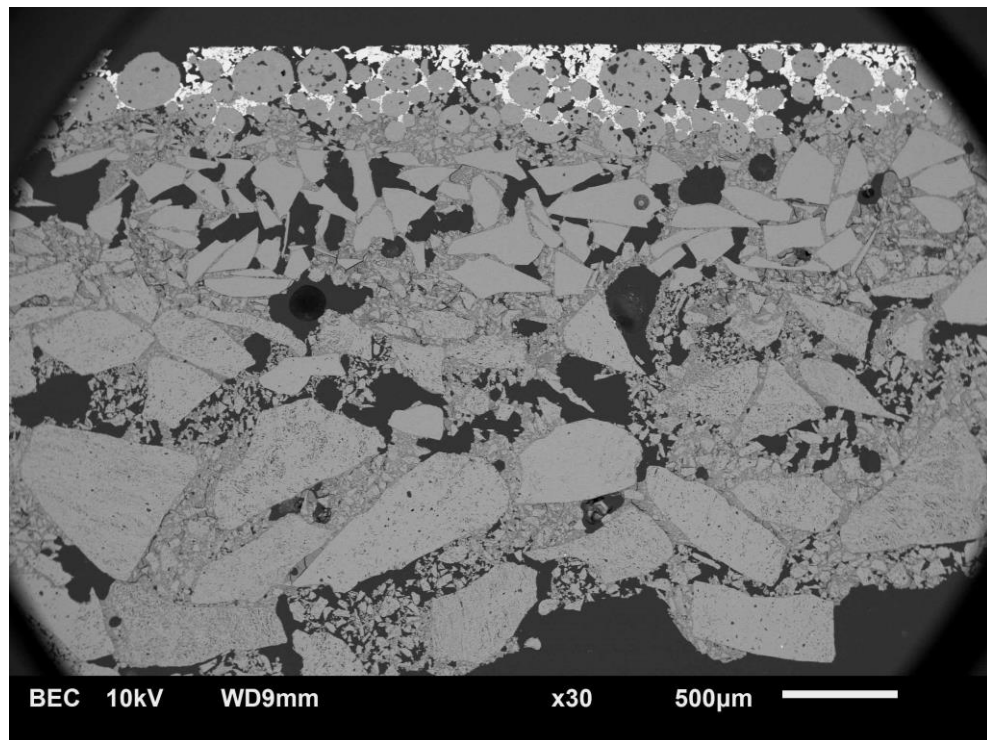
Obr. 57 Obrazová analýza 3 varianty 2

ALC–A systém tvoří velmi porézní skořepinu a celistvost mezi druhou a třetí vrstvou je velmi slabá z důvodu, že keramická suspenze třetí vrstvy slabě penetruje do ostřiva druhého obalu. Z obrazové analýzy ALC–A systému je viditelná velká prodyšnost skořepinové formy.



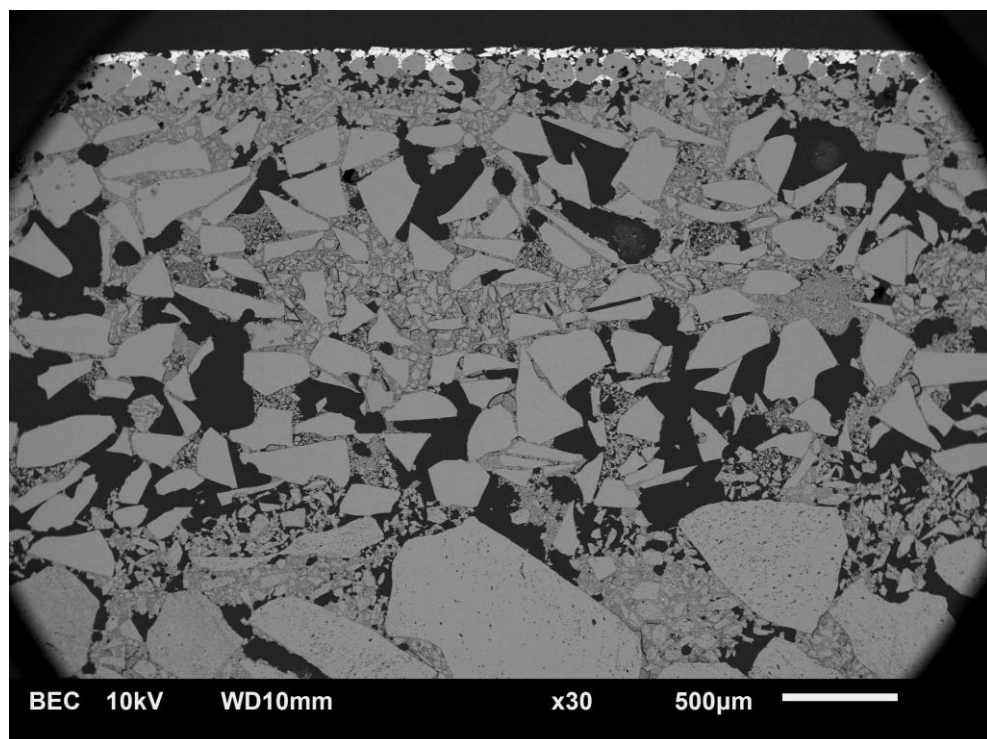
Obr. 58 Obrazová analýza 1 obalovacího systému ALC–A





Obr. 59 Obrazová analýza 2 obalovacího systému ALC-A

U ALC-B systému je vidět lepší penetraci suspenze mezi druhou a třetí vrstvou.



Obr. 60 Obrazová analýza obalovacího systému ALC-B

### 3.8 Zhodnocení

Na základě provedených zkoušek byly porovnány vlastnosti jak navrhovaných variant složení keramických skořepin, tak stávající obalovací systém, používaný ve formě Alucast, s.r.o. Primární keramické suspenze byly porovnány na základě destičkové zkoušky, která ukazuje nabalovací schopnost keramických břechek. Vyrobené skořepiny byly porovnávány na základě tří různých zkoušek. U skořepin byly testovány jejich pevnost v ohybu za syrova a také za zvýšených teplot, dále jejich prodyšnost opět za různých teplot a na základě obrazové analýzy byla zhodnocena jejich struktura. Všechny možnosti byly porovnány také z finančního hlediska.

Destičková zkouška (plate weight test) u primárních keramických skořepin variant 1 a 2 ukázala, že varianta 2, čili břecha s moučkou WRG IC ESM má lepší nabalovací schopnost než primární břecha varianty 1 (moučka Molochit 60).

Pevnost skořepin za syrova (CMOR test) byla nejlepší u stávajícího obalovacího systému ALC-B a u ostatních typů skořepin (varianta 1, varianta 2 a ALC-A) je pevnost za syrova velice podobná. Navíc je velmi vysoká pevnost za syrova u skořepin pouze se čtyřmi obaly, čeho by se dalo využít a u menších odlítků vyrábět pouze čtyřvrstvé skořepiny, což by ušetřilo čas i materiál. Při vyšších teplotách je opět nejlepší skořepina ALC-B. U měření pevnosti v ohybu lze pozorovat, že s vyšší teplotou skořepina měkne a její pevnost klesá do doby, než dojde ke keramizačnímu žhání (zhruba 1000 °C), kdy dojde k výraznému nárůstu pevnosti.

Prodyšnost je nejlepší u stávajícího obalovacího systému, a to dokonce až dvojnásobně v porovnání s navrhovanými variantami. Mezi variantami 1 a 2 není zásadní rozdíl. Mírně vyšší prodyšnost má varianta 1 (Mulgrain 60), ale v porovnání s prodyšností u stávajícího obalovacího systému je tento rozdíl zanedbatelný. U měření prodyšnosti lze pozorovat, že se zvyšující se teplotou prodyšnost skořepin výrazně klesá.

Při porovnávání vzorků skořepin na základě obrazové analýzy má nejlepší strukturu varianta 1. Její skořepina je celistvá a všechny jednotlivé vrstvy jsou výborně propojeny. Tloušťka skořepiny u varianty 1 je rovnoměrná ve všech místech. Varianta 2 je obdobná s tím rozdílem, že keramická suspenze druhé vrstvy hůře penetruje mezi zrna ostřiva a přechod mezi vrstvou 1 a 2 je méně celistvý. Problém je i v nerovnoměrné tloušťce skořepiny, která je v rozích menší. U stávajícího obalovacího systému je skořepina velmi porézní, což je možné pozorovat také při měření prodyšnosti, keramická suspenze třetího obalu špatně penetruje mezi zrna ostřiva a skořepina tak nepůsobí celistvě.

Z ekonomického pohledu je nejlevnější moučka Mulgrain 60 (varianta 1) a naopak nejdražší je zirkonová moučka, která je aktuálně používána. Aktuální poměr cen je následující:

- Zirkon (ALC systém): 100 %
- Mulgrain 60: 54 %
- WRG IC ESM: 71 %

### 3.9 Doporučení

Nejvhodnějším složením pro výrobu keramických skořepin je varianta 1, u které je moučka primárního obalu Mulgrain 60, jejíž cena je 54% oproti stávajícímu obalovacímu systému. Problémem může být horší prodyšnost ve srovnání se současně používaným obalovacím systémem. Dále je doporučeno pro menší odlitky odzkoušet skořepinu pouze se čtyřmi obaly. Dojde tak k dalšímu ušetření materiálu, času potřebného pro výrobu skořepinové formy a dalších výrobních nákladů.

Doporučené testování keramických suspenzí:

- Viskozita (2× za směnu)
- Teplota (denně)
- Hodnota pH (denně)
- Hustota (3× týdně)

## ZÁVĚR

V teoretické části této diplomové práce byla popsána technologie vytavitelného modelu s detailnějším zaměřením na výrobu keramické skořepinové formy. Teoretická část se zabývá i popisem výroby skořepin na robotickém pracovišti.

Cílem experimentální části bylo zvolit nejvhodnější složení pro obalovací systém, který nahradí systém současně používaný. V experimentální části jsou popsány jednotlivé komponenty složení navrhovaných variant. Porovnání variant obalovacích systémů proběhlo na základě různých testů (destičková zkouška, zkouška pevnosti v ohybu, měření prodyšnosti a vyhodnocení obrazové analýzy) a v úvahu byla vzata i ekonomická stránka věci. Diplomová práce se také zabývá doporučením pro zlepšení procesu kontroly keramických suspenzí ve slévárně Alucast, s.r.o.

Na základě provedených zkoušek a ekonomického zhodnocení je doporučeno nahradit stávající obalovací systém variantou 1, jejíž složení je uvedeno v tabulce níže.

Tab. 20 Složení doporučeného obalovacího systému

<b>Varianta 1</b>				
		<b>1. obal</b>	<b>2. + 3. obal</b>	<b>4. + 5. obal</b>
<b>břečka</b>	<b>pojivo</b>	Primcote PLUS	Matrixsol 30	Matrixsol 30
	<b>moučka</b>	Mulgrain 60–325	Molochit 120	Molochit 120
	<b>aditiva</b>		MXC Excel Concentrate	MXC Excel X2 Blend
	<b>další</b>		Destilovaná voda	Destilovaná voda
<b>posyp</b>		Molochit 50–80	Molochit 30–80	Molochit 16–30

## SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] HÝBAL, Ondřej. *Slévárenské technologie z pohledu rozměrové přesnosti odlitek*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [2] BEELEY, Peter R. a Robert F. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 09-017-1666-9.
- [3] DOŠKÁŘ, Josef, Jan GABRIEL, Miroslav HOUŠŤ a Miroslav PAVELKA. *Výroba přesných odlitek*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1976. DT 621.746.
- [4] BIJVOET, Mark. *Ceramic Shell Preparation and Control* [prezentace]. Káhira, 2007.
- [5] Presne liti. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.edb.cz/grmat/nabidky/109312x2.jpg>
- [6] SOUKUPOVÁ, Lucie. *Optimalizace technologie výroby odlitek ze slitin Al metodou vytavitelného modelu*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Milan Horáček, CSc.
- [7] Presne-odlitky.jpg. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.com/PBS/media/system/images/presne-odlitky.jpg>
- [8] FRULLI, Danilo, Thomas KRUMREI a Joachim WOLFF. *Latest Trends in Refractory Minerals for Primary and Back-up coats* [prezentace]. Paříž, 2013.
- [9] BIJVOET, Mark. *Refractories for the Investment Casting Industry and Ceramic Shell Strength*. [prezentace] Káhira, 2007.
- [10] FRULLI, Danilo, Maria Cristina DI DAVIDE a Erich SCHMIDT-KLUGE. *Alumina and Silico-Aluminate Refractories and their role in ceramic mould properties* [prezentace]. Bilbao, 2006.
- [11] Fused quartz. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_quartz](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_quartz)
- [12] Aluminium oxide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium\\_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide)
- [13] PH. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/PH>
- [14] BEDDOW, Jarrad. *Introduction to the Investment Casting Process* [prezentace]. Velká Británie, 2007.
- [15] ROSMAIT, Russ. *Slurry Make Up and Control* [prezentace]. Spojené státy americké, 2005.

- [16] 4.39mm Stainless Steel Zahn Cups 4 Paint Viscosity Cup Silver. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://img.staticbg.com/thumb/water/oaupload/banggood/images/DE/A7/14245a18-e68a-2273-38ae-6155dbcd5e44.jpg>
- [17] Earlex Ford No. 4 Viscosity Cup for All Models. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://images.homedepot-static.com/productImages/4d640f0a-387b-4108-9c9d-55d0ee5362aa/svn/earlex-sprayer-parts-0sg243-64\\_1000.jpg](https://images.homedepot-static.com/productImages/4d640f0a-387b-4108-9c9d-55d0ee5362aa/svn/earlex-sprayer-parts-0sg243-64_1000.jpg)
- [18] EDGE pH/ORP metr HI2002-02. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://img.unimed.cz/images/hanna%20instruments/hi2002\\_main.jpg](https://img.unimed.cz/images/hanna%20instruments/hi2002_main.jpg)
- [19] Microbial Test Kit. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://www.lotioncrafter.com/reference/bacteria\\_colonies.jpg](https://www.lotioncrafter.com/reference/bacteria_colonies.jpg)
- [20] Elektronový mikroskop. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%BD\\_mikroskop](https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%BD_mikroskop)
- [21] KRUMREI, Thomas a Danilo FRULLI. *Ceramic shell performance and characterisation: methods and examples* [prezentace]. Pavlov, 2012.
- [22] Capture5.jpg. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.remet.com/uk/wp-content/uploads/sites/2/2017/02/Capture5.jpg>
- [23] CI0217-ta-slide2-900px.jpg. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.ceramicindustry.com/ext/resources/Issues/2017/February/CI0217-ta-slide2-900px.jpg>
- [24] Sem\_img2.png. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: [http://www.nanoimages.com/wp-content/uploads/sem\\_img2.png](http://www.nanoimages.com/wp-content/uploads/sem_img2.png)
- [25] O\_nas.jpg. In: *Google images* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [http://alucast.cz/data/userfiles/images/o\\_nas.jpg](http://alucast.cz/data/userfiles/images/o_nas.jpg)
- [26] Primcote® PLUS Binder. *Ransom & Randolph* [online]. Spojené státy americké [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22\\_06cb4b3ff2994ceba822bb5e5507e57e.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22_06cb4b3ff2994ceba822bb5e5507e57e.pdf)
- [27] Matrixsol® 30 Colloidal Silica. *Ransom & Randolph* [online]. Spojené státy americké [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22\\_59ac1c10cb194d93b58898652217c0a4.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22_59ac1c10cb194d93b58898652217c0a4.pdf)
- [28] MXC Excel Contretrate. *Ransom & Randolph* [online]. Spojené státy americké [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22\\_6c9ff9ac01cd4ce590842608e64ca575.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22_6c9ff9ac01cd4ce590842608e64ca575.pdf)

[29] MXC Excel X2 Blend. *Ransom & Randolph* [online]. Spojené státy americké [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: [https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22\\_bfdfe1e220704031948c73db8304a6a1.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22_bfdfe1e220704031948c73db8304a6a1.pdf)

[30] *MULGRAIN® GRAINS AND FLOURS: CALCINED MULLITE*. Spojené státy americké, 2014.

[31] *WRG IC ESM*. Německo, 2017.

[32] *MOLOCHITE. IMERYS REFRACTORY MINERALS* [online]. Velká Británie [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.imerys-ceramics.com/sites/default/files/2018-03/Molochite.pdf>