



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## SOUČASNÉ TRENDY VE VÝROBĚ KERAMICKÝCH SKOŘEPINOVÝCH FOREM

ACTUAL TRENDS IN MANUFACTURE OF CERAMIC SHELL MOULDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PAVEL ŠTIPL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Pavel Štipl

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

### **Současné trendy ve výrobě keramických skořepinových forem**

v anglickém jazyce:

#### **Actual trends in manufacture of ceramic shell moulds**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled surovin a postupů pro vytvoření optimální keramické skořepinové formy splňující současné požadavky na formu kladené.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše zaměřená na používané suroviny a postupy k vytvoření keramické skořepinové formy technologie vytavitelného modelu.

Seznam odborné literatury:

1. BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
2. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.
3. HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství. 2001, č. 10, s. 570 –580. ISSN 0037-6825.
4. HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. In: Proceedings of the World Technical Forum. Česká slévárenská společnost Brno, 1–3.6.2009.
5. HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Capabilities of Investment Casting Technology. Livarski Vestnik. Duben 2006, vol. 54, no. 4, p. 175-186. ISSN 0024-5135.
6. HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets. Foundry Trade Journal. 2007, vol. 180, no. 3641, p. 32-35. ISSN 1758-9789.
7. HORÁČEK, M. Accuracy of castings manufactured by the lost wax process. Foundry Trade Journal. October 1997, no. 3535, p. 424-429. ISSN 1758-9789.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 25.10.2011

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o současných trendech ve výrobě keramických skořepinových forem. V první části je popsána historie přesných odlitků, jejich využití a přehled světové produkce. V dalších částech je rozebrán postup výroby keramické skořepinové formy s využitím současných materiálů a technologií. V závěrečné části jsou popsány vady, které souvisejí s výrobou keramických skořepinových forem. Cílem této práce je vytvořit literární rešerši zaměřenou na používané suroviny a postupy vedoucí k vytvoření keramické skořepinové formy pro technologii vytavitelného modelu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Přesné lití, vytavitelný model, keramická skořepinová forma, keramická suspenze, obalování, vytavování, žíhání, vady skořepinových forem.

## ABSTRACT

This thesis deals with the current trends in the production of ceramic shell moulds. The first part describes the history of investment casting, their use and an overview of world production. In the following parts is out of print the production process of ceramic shell mould using contemporary materials and technologies. The final section describes the defects associated with the production of ceramic shell moulds. The aim of this work is to create a literature search focused on raw materials and processes used to create a ceramic shell mould for investment casting technology.

## KEYWORDS

Investment casting, lost wax, ceramic shell mould, ceramic suspension, coating, de-waxing, firing, ceramic shell moulds defects.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTIPL, P. *Současné trendy ve výrobě keramických skořepinových forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 47 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Současné trendy ve výrobě keramických skořepinových forem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 12.5.2012 v Brně

.....  
Pavel Štípl

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

**OBSAH**

Abstrakt .....	4
Prohlášení .....	5
Poděkování .....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	8
1 Historie .....	9
2 Přehled světové produkce odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu .....	10
2.1 Výroba přesných odlitků ve světě .....	10
2.2 Vývoj trhu s přesnými odlitky v posledních letech .....	10
3 Technologie přesného lití na vytavitelný model.....	11
4 Výroba keramických forem pro metodu vytavitelného modelu .....	13
4.1 Keramická suspenze .....	14
4.1.1 Pojiva.....	14
4.1.2 Plniva (moučky) .....	14
4.1.3 Příprava keramické suspenze .....	15
4.1.4 Kontrola a testování keramické suspenze.....	15
4.2 Posypové materiály (ostřivo) .....	20
4.3 Obalování.....	22
4.3.1 Příprava voskových modelů – odmaštění.....	23
4.3.2 Robotizovaná linka.....	24
4.3.3 Posypávání .....	25
4.3.4 Sušení nebo chemické vytvrzování .....	25
4.4 Vytavování vosku .....	26
4.5 Keramizační žhání skořepiny .....	28
5 Vady související se skořepinovou formou .....	30
5.1 Problematika čištění voskových modelů .....	30
5.2 Problémy spojené s přípravou keramické suspenze.....	32
5.3 Udržování keramické suspenze a posypu .....	35
5.4 Problémy spojené se sušením skořepiny .....	37
5.5 Problémy spojené s vytavování vosku.....	40
Závěr.....	44
Seznam použitých zdrojů.....	45
Seznam obrázků .....	47
Seznam grafů .....	47
Seznam tabulek.....	47

## ÚVOD

Výroba přesných odlitků metodou vytavitelného modelu, patří mezi technologie „near net shape“ („téměř na hotovo“). Vyráběné odlitky jsou velmi blízké hotovým výrobkům a není proto nutné provádět další dokončovací operace. Technologie vytavitelného modelu umožňuje vyrábět odlitky s vysokou kvalitou povrchu, rozměrovou přesností, tvarovou a materiálovou rozmanitostí za přijatelné výrobní náklady. Lze tak vyrábět tvarově velice složité výrobky z těžko obrobitelných materiálů, u kterých by výroba jinou technologií byla velice nákladná nebo zcela nemožná. Díky tomu jsou tyto odlitky využívány v široké průmyslové praxi.

Cílem této bakalářské práce je popsat výrobu keramické skořepinové formy za použití nejmodernějších výrobních technologií a materiálů. V práci je nejprve popsána historie technologie vytavitelného modelu a přehled světové produkce odlitků, které jsou vyráběné touto progresivní metodou. Následuje stručný popis celého procesu výroby odlitku od vzniku voskového modelu, až po výstupní kontrolu. Dále je již podrobně rozebrána problematika výroby keramické skořepinové formy. Práce je zaměřena především na používané suroviny a postupy pro vytvoření optimální skořepinové formy splňující současné požadavky na ni kladené. V závěru práce jsou pak popsány vybrané vady, které souvisejí s výrobou formy a také možná řešení, které vedou k odstranění nebo alespoň minimalizaci vzniku vad.

## 1 HISTORIE

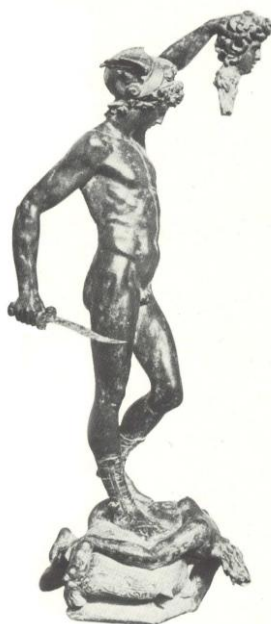
Základní technika lití na vytavitelný model je známa již více než šest tisíc let. To dokazují především nálezy z oblastí dnešní Palestiny, Thajska, Španělska, Egypta, Číny, Itálie či Mexika. Z archeologických nálezů pak lze říci, že dávnověká technologie byla shodná s dnešní technologií jen v principu. Originální model ze včelího vosku byl ručně obalován vhodným typem hlíny a tak byla vyrobena vlastní forma. [1], [2]

V pozdější době raného novověku bylo zejména v renesanční Itálii nalezeno dostatek důkazů o existenci metody vytavitelného modelu v uměleckém lití. Z této doby pochází také nejpodrobnější popis této technologie. Popsal ji italský zlatník Benvenuto Cellini, jehož nejznámějším dílem (odlitekem) je bronzová socha „Persea držící hlavu Medusy.“ [3]

V devatenáctém století, kdy se používaly především dělené pískové formy, upadla metoda výroby odlitků vytavitelným modelem téměř v zapomnutí. Až koncem tohoto století se uplatnila výroba forem vytavitelným modelem ve stomatologii a v bižuterii.

Teprve 2. světová válka je nástupem průmyslového využití přesného lití. Ukázalo se, že přes všechna zdokonalení nelze litím do dělených pískových forem vyrábět tvarově velmi složité odlitky s úzkými výrobními (rozměrovými) tolerancemi a s velkou jakostí povrchu. Přesné lití vytavitelným modelem prošlo řadou technologických změn, jako např. zavedení rozměrově stálých modelových hmot, technologie samonosné skořepiny o vysoké pevnosti a rozměrové stálosti za vyšších teplot, zavedení vakuové techniky tavení a lití, či zavedení vložených keramických jader k vytvoření velmi složitých a přesných dutin. [2]

Dnes se přesné lití vytavitelným modelem úspěšně používá ve strojírenství, zejména v energetice, v leteckém průmyslu, ve zbrojním průmyslu, v elektrotechnice, v lékařství (náhrady kloubů, stomatologie), v uměleckém lití a v dalších oblastech, kde se využívá dosaženého pokroku této progresivní technologie. [3]

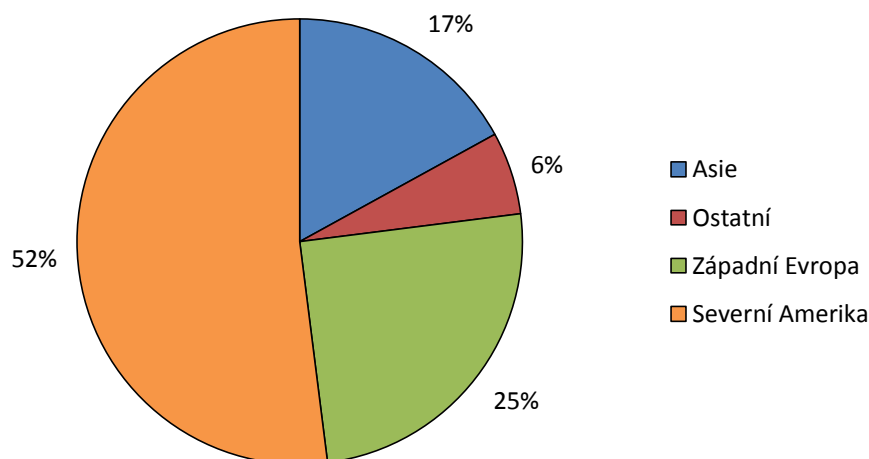


Obr. 1 Perseus držící hlavu Medusy [3]

## 2 PŘEHLED SVĚTOVÉ PRODUKCE ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU

### 2.1 Výroba přesných odlitků ve světě

Z hlediska geografie lze výrobu odlitků metodou vytavitelného modelu rozdělit do několika teritorií, seřazeno procentuálně dle vyráběného objemu odlitků (graf 1) je patrné, že hlavním distributorem přesných odlitků je Severní Amerika s 52%, druhá je západní Evropa s 25%, třetí Asie se 17% a ostatní destinace doplňují graf s 6%.



Graf 1 Přehled světové výroby odlitků metodou vytavitelného modelu [3]

### 2.2 Vývoj trhu s přesnými odlitky v posledních letech

Přibližně od roku 2008 produkci odlitků vyráběných technologií vytavitelného modelu (TVM) ovlivňovala ekonomická krize. To znamenalo pokles výroby především v automobilovém průmyslu, naopak výroba pro letecký a energetický průmysl zůstala prakticky nedotčena, až během roku 2009 došlo k prudkému propadu produkce odlitků i pro tyto trhy. „Západní“ slévárny byly také nuceny stahovat výrobu komerčních odlitků zpět do mateřských firem, čímž se radikálně snížil export sléváren z Asie.

Dnes se podmínky na trhu s odlitky TVM po globální ekonomické krizi stabilizovaly, s tím, že většina zemí je oficiálně z recese venku. Rostoucí průmyslovou výrobu lze očekávat v oblasti energetiky (plynové turbíny). Výzkum a rozvoj v leteckém průmyslu v oblasti výroby efektivnějších motorů povede velmi pravděpodobně k potřebě složitějších a zřejmě i rozměrnějších odlitků.

Příležitosti pro výrobu nových odlitků lze hledat v požadavcích na nové palivové a výfukové systémy, v několikanásobných turbodmychadlech a přímo vstřikovacích systémech, v hybridních a elektrických pohonech vozidel a v dalším rozvoji zdravotnických potřeb (implantáty, diagnostika atd.) [4]

### 3 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

Tato technologie patří mezi nejstarší slévárenské technologie, která dnes umožňuje odlévat i složité díly bez nutnosti dalšího obrábění na čistý tvar, zároveň lze dosáhnout vynikající přesnosti a kvality povrchu odlitku. Zvláště výhodně se uplatňuje metoda přesného lití u těžko obrobitelných materiálů (např. reaktivní titan a jeho slitiny) nebo u součástí velmi složitého tvaru, kde je výroba součástí jinou technologií mimořádně nákladná nebo dokonce zcela nemožná. Typickými příklady jsou lopatky nebo celé věnce pro spalovací turbíny, řezné nástroje z rychlořezných kovů, součásti měřicích zařízení apod.



Obr. 2 Ukázka odlitků vyráběných technologií vytavitelného modelu [7]

#### **Princip technologie vytavitelného modelu**

Ze snadno tavitelného materiálu (vosku) se do kovové matečné formy vstříkne nebo odlije přesný tvar odlitku s přídavkem na smrštění. Po odlití a očištění se k takto vzniklému modelu připojí vtoková soustava a nálitky. Obvykle se pro větší počet odlitků používá jeden společný licí kúl a společný nálitek, čímž vznikne „licí stromeček.“ Tvar stromečku ovlivňuje způsob připojení modelů, technika obalování, vytavování vosku, lití a oddělování odlitků od vtokové soustavy.

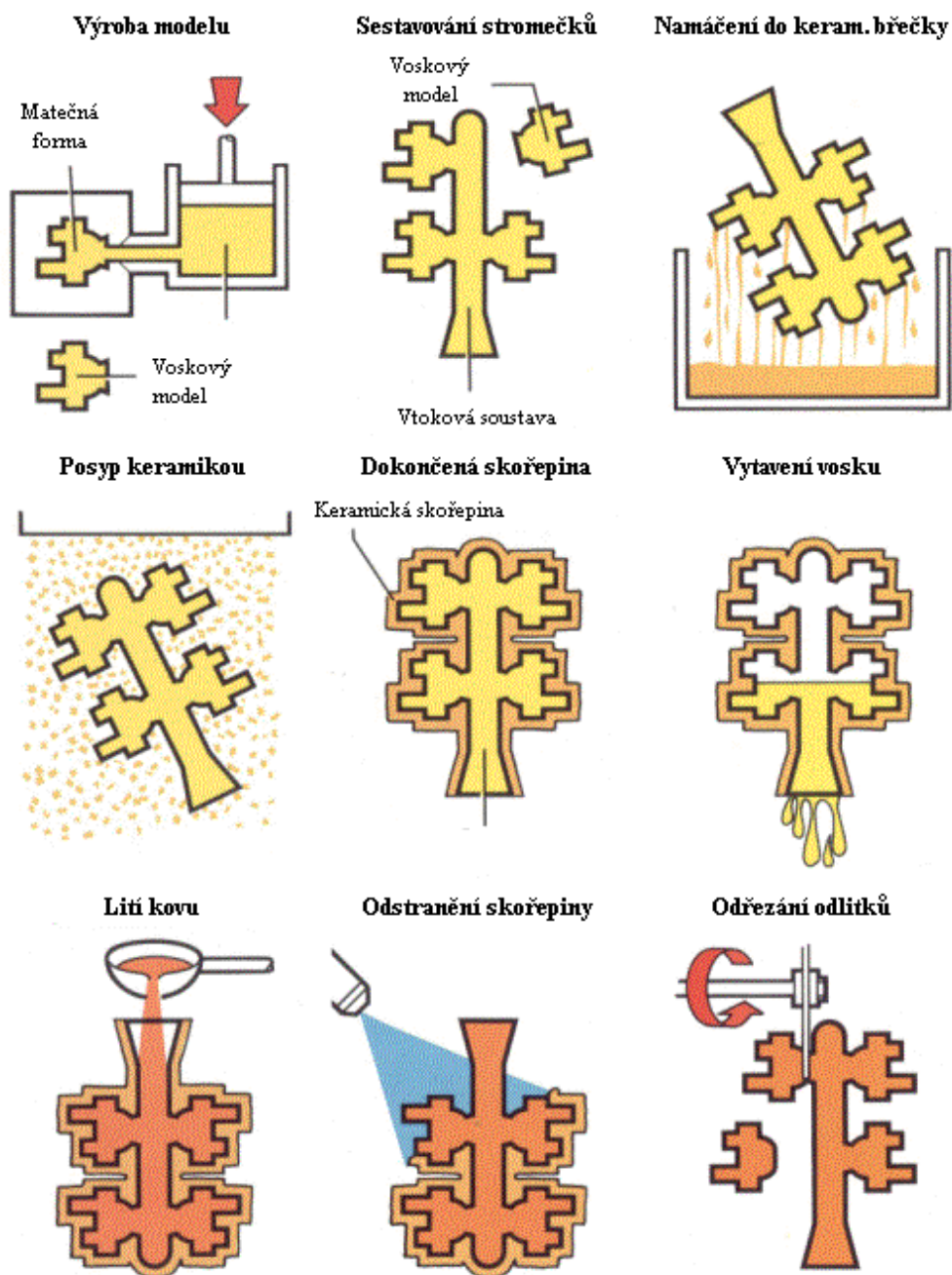
Celá sestava se ponoří do obalové keramické suspenze, která se skládá z pojiva (alkosoly nebo hydrosoly) a plniva (nejčastěji křemenná moučka). Po vyjmutí se ulpělá keramická suspenze zasype posypovým materiálem. Vzniklá vrstva se nechá vysušit a ztuhnout, čímž na modelu vzniká tenká skořepina. Podle hmoty odlitku se celý postup 5krát až 15krát opakuje, až vznikne obal o tloušťce 3 až 10 mm, který musí být dostatečně pevný, aby vydržel následující technologické operace.

Model se ze skořepiny odstraňuje převážně pomocí přehřáté páry v autoklávu, čímž vznikne forma. Tato forma je buď samonosná, nebo se u těžších odlitků zpevňuje zasypáním pískem, či zalitím cementovou kaší.

Zbytky organických látek se odstraní žiháním při 900 až 1000 °C. Ihned po vyjmutí z pece se ještě do žhavé formy odlévá, takže roztavený kov vyplní i ty nejtěsnější průřezy.

Po odlití a ztuhnutí odlévaného kovu se skořepina odstraní oklepáním, otryskáním jemným tryskacím materiálem nebo rozpuštěním v roztaveném louhu.

Po očištění jsou odlitky podrobeny kontrolám. Kontrolují se především koncové rozměry, vnitřní a vnější vady. [3], [5], [6]



Obr. 3 Princip technologie vytavitelného modelu [8]

## 4 VÝROBA KERAMICKÝCH FOREM PRO METODU VYTAVITELNÉHO MODELU

Charakteristickým znakem metody vytavitelných modelů je nedělená keramická forma. Všechny keramické skořepinové formy se skládají ze tří složek: pojiva, plniva a posypového materiálu. Všeobecně se používá především technologie samonosné skořepiny. Tato technologie má řadu předností oproti dřívějším technologiím:

- úspora materiálu
- menší pracnost
- kratší doba výroby skořepiny
- snadnější uvolňování odlitků z formy
- zlepšená propustnost plynů při lití
- snadnější manipulace se skořepinami (jsou lehčí a pevnější)
- snadná mechanizace a automatizace výroby
- rychlejší ochlazování a tuhnutí kovu ve skořepinové formě a zlepšení struktury odlitku

Skořepinová forma je vytvořena obalováním voskového modelu. Model potřebný k výrobě formy se vždy zničí, obvykle vytavením, proto je pro každou formu zapotřebí nový model. Jádra se vytvoří buď současně při formovacím pochodu, nebo se hotová jádra vkládají do voskových modelů, nejčastěji zastříknutím při výrobě. Kov se lije převážně do žhavých forem, protože skořepinové formy jsou složeny z vrstev, mají mnohem horší tepelnou vodivost a kov v nich tuhne pomaleji. Cílem celého procesu výroby skořepiny je vyrobit skořepinu o vysoké pevnosti a odolnosti za tepla, která nereaguje na vlévanou slitinu a minimálně se objemově mění během výrobního procesu. Skořepina musí mít také vyhovující prodyšnost. [2], [1]



Obr. 4 Keramická skořepinová forma [9]

## 4.1 Keramická suspenze

Keramické suspenze (břečky), jsou viskózní kapaliny, které se skládají z pojiva a plniva. Jsou to v podstatě jemně suspendované žáruvzdorné materiály určité velikosti zrna v kapalném pojivu. V dnešní době se pro tyto účely používá velké množství materiálů, které mají různé vlastnosti. Volba pojiva a keramických materiálů určuje vlastnosti celé skořepiny. Je proto velmi důležité úplné pochopení vlastností a interakcí mezi jednotlivými materiály. Nedostatečné pochopení vede ke vzniku vad skořepiny. [1], [2]

### 4.1.1 Pojiva

Pojiva spolu s plnivem (moučkou) tvoří vlastní obalovou hmotu na výrobu skořepinových forem. Na pojivo klademe následující požadavky:

- Nesmí snižovat žáruvzdornost formy, musí být netečné při žíhání formy k žáruvzdornému materiálu i k roztavenému kovu.
- Musí formě předat po ztuhnutí dostatečnou pevnost jak po vysušení, tak po žíhání.

Jako pojiva formovacích hmot na skořepinové formy se používají především koloidní roztoky kysličníku křemičitého a organické sloučeniny hliníku, titanu, zirkonu a některé anorganické sloučeniny. [2]

Křemičitanová pojiva mohou být buď na vodní bázi, nebo na bázi alkoholu. Formy s pojivem na vodní bázi jsou obvykle sušeny na vzduchu a jsou všeobecně používány pro lícni obaly. Vodní báze ve srovnání s pojivy na bázi alkoholu pomaleji schnou. Výhoda alkoholových pojiv je také v možnosti vytvrzení v prostředí obsahující amoniak. Tato pojiva jsou používána zejména u zesilovacích obalů, zvláště při použití robotických linek. Při použití obalové břečky na bázi alkoholu a vytvrzování amoniakem, lze další obal aplikovat během několika minut. Slévárny dávají přednost pojivům na vodní bázi z důvodu jejich ekologické a uživatelsky přívětivé povaze před rychle schnoucími pojivy na alkoholové bázi. Potřeba zvýšení bezpečnosti pro obsluhu pak vede k výhradnímu používání pojiva na vodní bázi, jak pro lícni, tak i pro zesilovací obaly.

Výhoda křemičitanových pojiv je především v možnosti dostatečně dlouhé manipulace s obalovou hmotou. Lze tak zajistit rovnoměrně hladký povrch a celkové pokrytí povrchu v posypové fázi. [1]

### 4.1.2 Plniva (moučky)

Základní vlastnosti keramických skořepin jdou dány především charakterem žáruvzdorného materiálu, protože více než 90 % skořepiny je tvořeno právě žáruvzdorným materiálem. Materiály používané jako plniva keramických břeček nebo jako posypové materiály mohou být stejné.

Pro výběr vhodného plniva jsou směrodatné následující vlastnosti: [11]

- tepelná roztažnost
- teplota tavení
- chemická netečnost vůči odlévaným kovům

- cena a dostupnost

Používaná pojiva pro keramické suspenze lze rozdělit do dvou základních skupin. Koloidní roztoky  $\text{SiO}_2$  a koloidní roztoky  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . V dnešní době se používají především keramické břečky na bázi  $\text{SiO}_2$  (chemicky stálé, dobrá cena, odolnost vysokým teplotám), na bázi zirkonu (vysoká teplotní a chemická stálost, nevýhodou je vysoká cena), na bázi korundu (vlastnosti podobné zirkonu, výrazně nižší cena) a na bázi aluminosilikátů (kombinace korundu a  $\text{SiO}_2$ , na vzájemném poměru závisí vlastnosti). [1]

#### 4.1.3 Příprava keramické suspenze

Příprava keramické suspenze spočívá ve vmíchání potřebného množství žáruvzdorného plniva do kapalného pojiva. Připravená suspenze se ponechá určitou dobu v klidu, aby unikl vzduch, který se vmíchal do suspenze spolu s plnivem, a aby se povrch jednotlivých částíček moučky dokonale smočil. Poměr hmotnosti moučky a objemu kapalného pojiva se řídí podle předepsané hustoty keramické suspenze, druhu pojiva a žáruvzdorného plniva.

Viskozita keramické suspenze se obvykle odvíjí od velikosti tvarové složitosti modelu. Drobné a tvarově složité modely s hlubokými drážkami, úzkými otvory a komplikovanými dutinami vyžadují řidší keramické břečky než modely rozměrnější a tvarově jednoduché. Viskozita břečky nesmí příliš kolísat.

Pro první, popřípadě druhý obal se obvykle volí řidší keramické suspenze než na ostatní obaly. Tomu se přizpůsobuje zrnitost posypových materiálů. Na řidší keramické břečky se používají jemnější, na hustší naopak hrubší.

Jedním z nejdůležitějších požadavků na kvalitu keramické suspenze jsou konstantní vlastnosti, které musí mít co nejdéle. Práce s ní má být co nejjednodušší a obaly z ní vyrobené mají co nejrychleji schnout. [2]

Podrobněji je tato problematika popsána v kapitole 5.2.

#### 4.1.4 Kontrola a testování keramické suspenze

Aby bylo možné vyrábět kvalitní přesné odlitky, je nutné kontrolovat a testovat keramickou suspenzi. Kvalitní kontrolou lze výrazně zvýšit účinnost a snížit náklady celého výrobního procesu. Je navržena řada jednoduchých zkušebních postupů, jejichž cílem je poskytnout hodnoty, na základě kterých je možné dále keramickou břečku upravovat, abychom dosáhli předepsané suspenze.

Testy keramických suspenzí lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupina testů sleduje chování keramické suspenze. Druhá skupina testů se zaměřuje na složení suspenze. Rozdělení testů pak vypadá následovně: [15], [18]

##### a) Chování keramické suspenze:

- viskozita
- krytí břečky (Plate weight)
- pění (Anti-foam test)

b) Složení keramické suspenze:

- pH
- bakterie
- měrná hmotnost
- 24 - hodinový test gelace
- procentuální obsah oxidu křemičitého
- procentuální obsah pevných polymerních látek
- procentuální obsah pevných látek v poživu

### 1) Měření pH

Koloidní částice oxidu křemičitého jsou záporně nabitě, s hodnotou pH kolem 10. Po přidání moučky dochází k poklesu pH. Při hodnotách pH nižších než 9, mohou koloidní částice oxidu křemičitého začít gelovat, což je nežádoucí. Důsledkem toho má keramická suspenze nižší životnost, dochází k horšímu vytavování voskového modelu a vzniku slabší skořepiny. Aby k tomuto nežádoucímu ději nedocházelo, je nutné zabránit oxidu uhličitému, který je obsažen v atmosféře v rozpouštění v keramické suspenzi. Dále je nezbytné udržet pH nad hodnotou 9,4, popřípadě použít amoniak nebo oxid draselný (louh) jako dokončovací příměs.

Samotné měření pH se provádí pomocí pH metru. [15]



Obr. 5 pH metr [19]

### 2) Měření viskozity

Měření viskozity je základním testem tečení břečky. Viskozita ovlivňuje především rovnoměrnost tloušťky povlaku a propojení mezi jednotlivými vrstvami. Je proto nutné sledovat a kontrolovat viskozitu, zda vyhovuje předepsanému intervalu.

Měření se provádí buď pomocí Zahnova, nebo Fordova pohárku. Po nabrání břečky z tanku se ihned zapnou stopky. Jejich zastavení se liší podle použitého pohárku. U Zahnova pohárku je to při přerušení plynulého toku břečky z pohárku, u Fordova pohárku pak ve chvíli, kdy se při pohledu shora objeví otvor, kterým břečka vytéká. [1], [15], [18]



Obr. 6 Zahnův [20] a Fordův pohárek [21]

### 3) Měření procentuálního obsahu oxidu křemičitého

Koloidní částice oxidu křemičitého umožňují vázání základního materiálu skořepiny. Nízké nebo vysoké hladiny oxidu křemičitého mohou skořepinu oslabit. Vysoká hladina může také způsobit destabilizaci břečky a její gelovatění. Doporučuje se proto, pozorně sledovat hodnoty  $\text{SiO}_2$  a dle potřeby suspenzi upravovat pomocí pojiva nebo vody.

Měření procentuálního obsahu oxidu křemičitého v břečce se provádí pomocí odměrné baňky a přesné digitální váhy. [15]

### 4) Měření procentuálního obsahu pevných polymerních látek

Polymerní látky (pokud jsou použity), působí spolu s křemenem jako pojivo, což zlepšuje některé vlastnosti keramické suspenze. Použité polymery mohou poskytovat počáteční pevnost v nevyžíhaném stavu, snižuje se doba výroby, zlepšuje se přilnavost a reologie břečky. Je však nutné pozorně sledovat hodnoty pevných polymerních látek a dle potřeby keramickou břečku upravovat pomocí polymeru nebo vody.

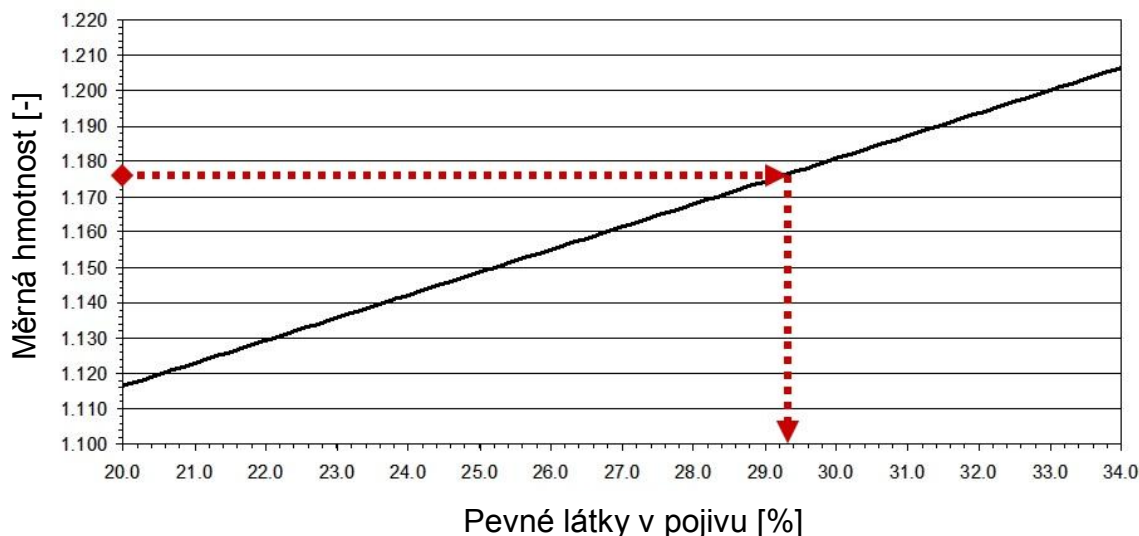
Měření se provádí pomocí bilance vlhkosti (obr. 7). [15]



Obr. 7 Měření obsahu pevných polymerních látek [15]

### 5) Měření procentuálního obsahu pevných látek v pojivu

Jedná se o kontrolu obsahu pevných částic v pojivu (žáruvzdorné látky nebo žáruvzdorné a polymerické látky). Nejprve je nutné separovat pojivo od žáruvzdorného materiálu a to buď pomocí odstředivky, nebo pomocí měrné hmotnosti (vysoké štíhlé baňky). Poté se určí měrná hmotnost nežádoucích látek a použije se graf zobrazující závislost měrné hmotnosti na pevných látkách v pojivu, který poskytuje dodavatel pojiva. Následně lze provést úpravy pomocí vody. [18]



Graf 2 Závislost měrné hmotnosti na pevných látkách v pojivu [18]

### 6) Měření krytí břechky (Plate weight)

Tento test je velmi významným ukazatelem toho, jak je keramická břecha schopna krýt a přilnout na voskový model. Toho se využívá především u primárních břechek, která přichází přímo do styku s voskovým modelem.

Test využívá kusu tenkého plátku plechu, který se nejprve zváží suchý. Následně je namočen do zkoušené břechky a zavěšen na váhu, kde se po určitých intervalech odečítá a zapisuje naměřená váha.

Přestože se jedná o jednoduchý test, může být ovlivněn řadou vnějších vlivů, jako je například rychlost schnutí břechky. [1]

### 7) Měření bakterií

Bakterie v keramické břechce způsobují pokles pH, špatné tečení břechky, zkracují životnost břechky a mohou oslabit výslednou skořepinu. Proto je nutné břechky na obsah bakterií testovat. V některých případech lze bakterie v břechce identifikovat pomocí silného zápachu. [15]

Samotný test se provádí pomocí živných pásků, které se po určité době vyhodnotí pomocí etalonových fotografií.

### 8) 24 – hodinový test gelace

Test spočívá ve vizuální kontrole vzorků po 24 – hodinovém testu gelace. Neúspěšný test může značit některý z těchto problémů: [15]

- vysoký obsah oxidu křemičitého
- bakterie
- stáří keramické suspenze
- nízké pH
- možná další kontaminace



Obr. 8 24 – hodinový test gelace [15]

### 9) Měření měrné hmotnosti

Jedná se o poměr hustoty materiálu ve srovnání s vodou. Její význam je především v tom, že určuje viskozitu suspenze a tloušťku obalu. Velká změna měrné hustoty suspenze může naznačovat nevyváženost její struktury. Nutné je proto pozorně sledovat hodnoty získané testováním.

Měření měrné hmotnosti se provádí hydrometry nebo vážením. [15]



Obr. 9 Hydrometr [22]



Obr. 10 Měření měrné hmotnosti vážením [15]

## 4.2 Posypové materiály (ostřívo)

Na výrobu skořepin se jako posypové žáruvzdorné materiály používají hlavně kysličníky a křemičitany. Pro praktické průmyslové využití se z kysličníků využívá především  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (korund) a  $\text{ZrO}_2$  (oxid zirkoničitý). Z křemičitanů se využívá nejvíce mulitu, zirkonu, silimanitu a molochitu. [10], [11], [1], [8]

Následuje stručný popis nejčastěji používaných žáruvzdorných materiálů.

### 1) Zirkon

Zirkon se vyskytuje v přírodě ve formě jemného písku, těží se v různých částech světa (např. Florida, jižní Afrika, Austrálie). Používá se především u lícnic (primárních) obalů jako plnivo i jako posypový materiál, díky své výborné žáruvzdornosti (tab. 1) a netečnosti vůči odlévanému kovu. Částice přírodního zirkonu v podobě písku jsou příliš jemné pro použití na zesilovací obaly, proto jsou preferovány hrubší syntetické materiály. Nevýhodou zirkonu je jeho vysoká cena, proto je snahou vhodným mícháním jiných materiálů dosáhnout vlastností podobných zirkonu. [1], [12]

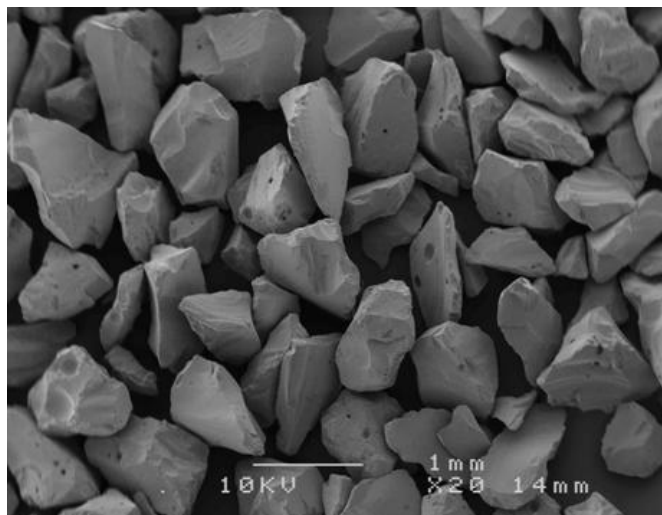


Obr. 11 Detailní snímek zrna zirkonu [11]

### 2) Tavený křemen

Získává se tavením čistého  $\text{SiO}_2$  (oxidu křemičitého). Používá se jako posypový žáruvzdorný materiál pro lícni i zesilovací obaly, ale také jako plnivo. Zde je však použití především u keramických břeček pro lícni obaly závislé na odlévaném kovu. Hlavní vlastnosti taveného křemenu jsou: [11], [12]

- vynikající vlastnosti za tepla: vysoká pevnost a rozpadavost, nízká deformace
- extrémně nízký koeficient tepelné roztažnosti
- konzistentní chemické složení
- nízká tepelná vodivost
- nízká žáruvzdornost

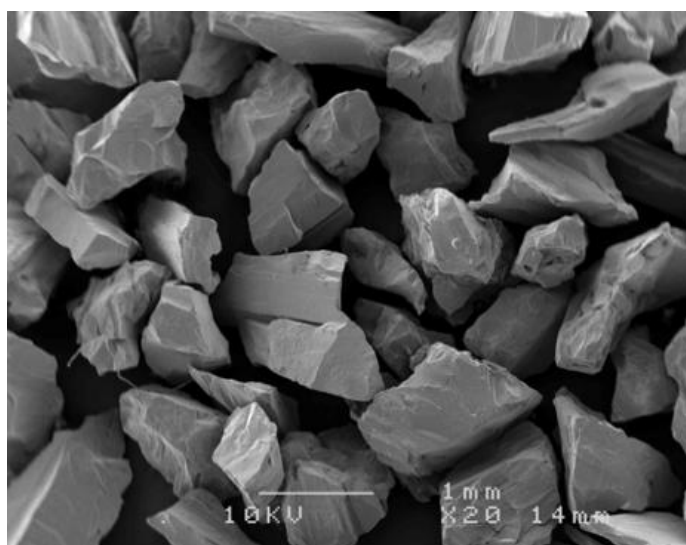


Obr. 12 Detailní snímek zrn taveného křemene [11]

### 3) Tavený mulit

Tavený mulit patří do skupiny hlinitokřemičitanů, které jsou obecně vyráběny z vysoce ušlechtilých rud, jako jsou bauxit nebo kaolin. Rudy a jíly jsou při výrobě optimálně kombinovány k dosažení požadovaného chemického složení. Tavený mulit se pak vyrábí tavením a následnou krystalizací oxidu křemičitého a oxidu hlinitého. Mulit se obvykle používá jako posypový materiál pro zesilovací obaly a jako plnivo pro keramické břechky určené pro výrobu těchto obalů. Hlavní vlastnosti taveného mulitu jsou: [11], [12]

- vysoká žáruvzdornost
- tepelná a chemická stabilita
- nízký koeficient tepelné roztažnosti



Obr. 13 Detailní snímek zrn taveného mulitu [11]

#### 4) Korund ( $Al_2O_3$ )

Rozlišují se dvě základní modifikace: tabulární a tavený, který se vyrábí podobně jako tavený oxid křemičitý, ovšem výroba je dražší především kvůli energetické náročnosti. Využití nalézá ve vysokoteplotních aplikacích jako posypový materiál a jen zřídka jako plnivo pro keramické břečky. Hlavní vlastnosti korundu jsou: [11], [12]

- vysoká žáruvzdornost
- dobrá mechanická pevnost zrn
- vysoký koeficient tepelné roztažnosti (ve srovnání s jinými materiály)

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti vybraných žáruvzdorných materiálů [11], [12]

Materiál	Měrná hmotnost [g/cm <sup>3</sup> ]	Bod tání [°C]	Koeficient teplotní roztažnosti (20-1000 °C), [10 <sup>-6</sup> /K]
Zirkon	4,54	2250	4,2
Tavený křemen	2,20	1710	<1
Tavený mulit	3,14	1850	5,1
Tabulární oxid hlinitý	3,55	2054	8,2
Tavený korund	3,98	2054	8,2

#### 4.3 Obalování

Již očištěné a usušené voskové stromečky, se namáčí do připravené obalové hmoty s předepsanou viskozitou. Namáčejí se pomalým ponořením stromečku při současném otáčení a naklánění se tak, aby obalová hmota stromeček rovnoměrně pokryla, a aby se neutvořily v koutech, rozích nebo drážkách vzduchové polštáře, nebo aby tam neulpěly vzduchové bublinky. [2]

Doba setrvání stromečku v obalové hmotě záleží na druhu obalu, kterým se právě obaluje. Lícní obal vyžaduje kratší dobu ponoru (přibližně 10-15 sekund) i odkapání než obaly zesilovací, které se musí ponechat v obalové hmotě delší dobu (přibližně 30 sekund). Musí se dostatečně zvlhčit, aby nový obal dobře přilnul k předchozímu. Doba ponoru druhého a dalších obalů přibližně indikuje přerušení vývinu vzduchových bublinek z předchozích obalů. Se stromečkem se po vyjmutí z obalové hmoty manipuluje tak, aby se obalová hmota rozdělila a přebytečná odkapala. [2], [15]

Jak již bylo uvedeno, rozlišujeme dva druhy obalů: lícní a zesilovací. První nanášený obal neboli obal lícní, je aplikován na očištěný voskový model a dostává se do kontaktu s odlévaným kovem, proto se jeho složení často liší od dalších obalů zesilovacích. Tyto rozdíly se vztahují jak na typ keramiky používané jako

plnivo obalové hmoty, tak na povaze pojiva. Zesilovací obaly jsou potřebné k tvorbě celkové tloušťky stěny skořepinové formy a velkou měrou ovlivňují celkové vlastnosti skořepiny. [1]



Obr. 14 Obalování pomocí robota [14]

#### 4.3.1 Příprava voskových modelů – odmaštění

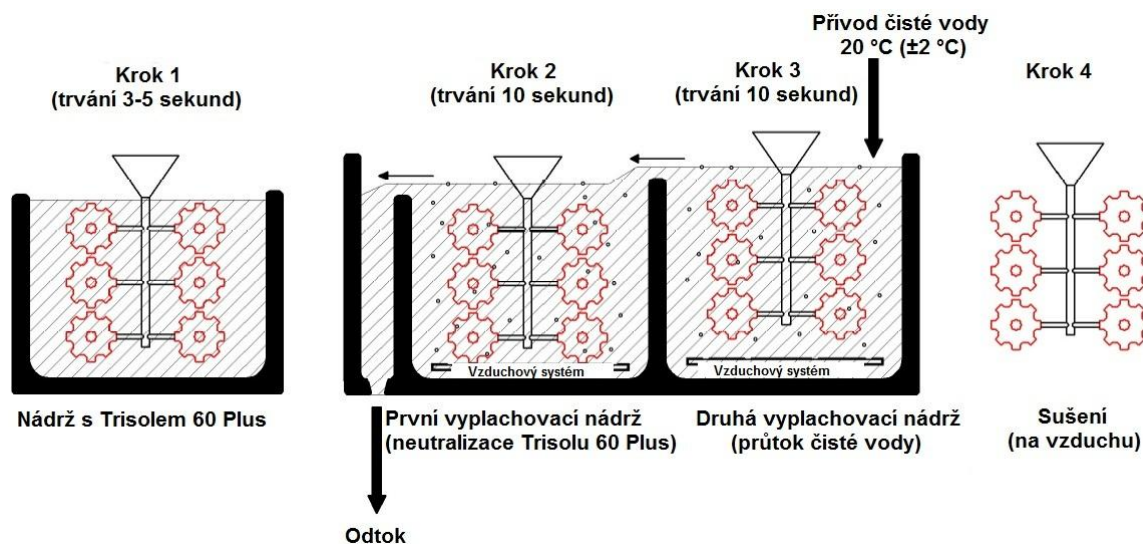
Před obalováním je nutné odstranit z povrchu sestaveného voskového stromečku zbytky dělicího prostředku (separátoru), použitého při výrobě v matečné formě, jinak lícni obal k povrchu voskových modelů dokonale nepřilne. Vyschlý obal pak pnutím popraská, odlupuje se a je příčinou výrobní poruchy. [2]

Nejrozšířenějším prostředkem pro čištění voskových modelů je Trisol 60 Plus, vyráběný firmou Blayson. Vyznačuje se především těmito výhodami:

- efektivní odstranění uhlovodíků a silikonů z povrchu modelu
- zlepšení přilnavosti lícniho obalu k povrchu modelů
- omyvatelný vodou, bez zápachu a škodlivých aromátů
- jednoduchá aplikace
- ekonomické použití (nízká rychlost odpařování oproti lihovinovým systémům)

Při samotném čištění je voskový model ponořen do nádrže s Trisolem 60 Plus po dobu 3-5 sekund. Poté se model vynoří a vloží do první nádrže s vodou, kde je přibližně 10 sekund proplachován a dochází k neutralizování čistícího prostředku. Model je poté přesunut do poslední nádrže, kde je již oplachován po dobu 10 sekund pouze čistou vodou (vše je shrnuto na obr. 15). Pro maximální kvalitu oplachu, se doporučuje udržovat teplotu čisté vody na 20 °C ( $\pm 2$  °C). Následuje sušení modelu, které probíhá velice rychle, na vzduchu. Pak je možné rovnou nanášet lícni obal. [13]

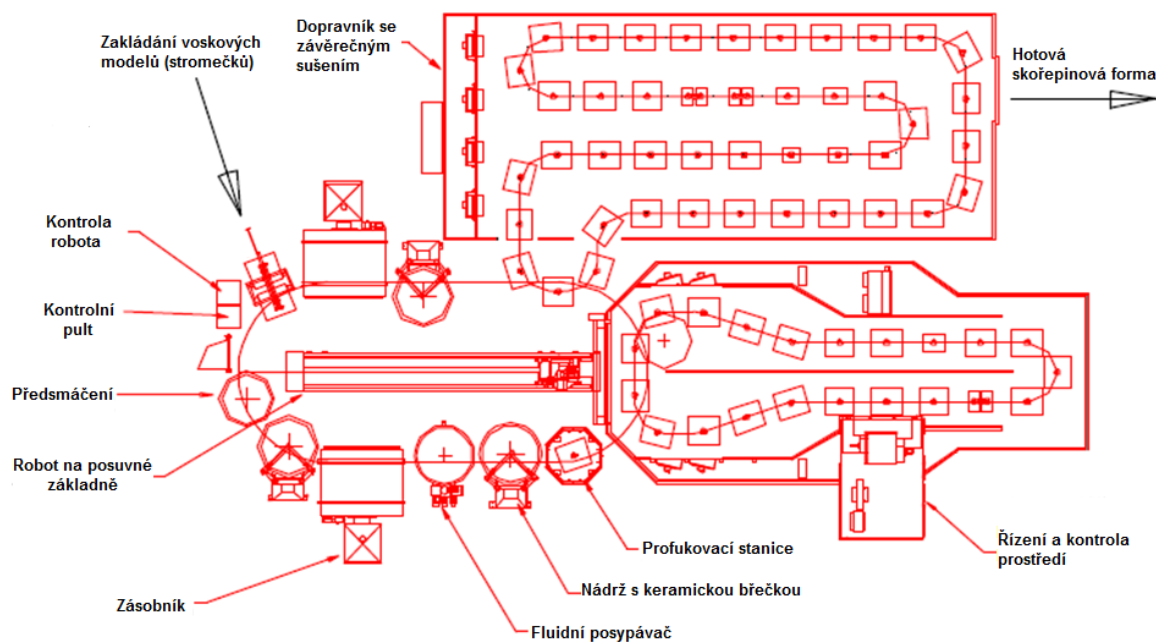
Dále je tato problematika popsána v kapitole 5.1.



Obr. 15 Očištění voskového modelu pomocí přípravku Trisol 60 Plus [13]

#### 4.3.2 Robotizovaná linka

Výroba skořepinových forem se výrazně mechanizuje. Do výroby se plně integruje posypová sekce obsahující kontinuální míchací nádrže pro břečky, dopravníky pro přepravu forem mezi jednotlivými provozy a robota, který provádí obalovací a posypové operace. Začleněn je také vhodný prostředek pro rychlé sušení při použití pojiva na bázi vody nebo prostory s amonným prostředím pro vytvrzení obalů s použitím pojiv na bázi alkoholu. Tohoto konceptu využívají slévárny po celém světě. [1]



Obr. 16 Automatizované pracoviště [10]

### 4.3.3 Posypávání

Posypávání žáruvzdorným posypovým materiálem se dříve provádělo mechanicky proudem volně padajícího materiálu. V dnešní době se používá především fluidní posypávání, tj. ponořením obaleného stromečku do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Tento způsob posypu je často prováděn pomocí robota, který koná jak rotační, tak příčné pohyby, aby bylo zajištěno, že všechny povrchy budou rovnoměrně pokryty. [2], [1]

Pro každý typ obalu se používá jiná zrnitost posypového materiálu. Pro lícní obaly se používá posypový materiál o zrnitosti 0,175-0,25 mm, pro zesilovací obaly pak zrnitost 0,25-0,5 mm. [8]

Obecně má mít posypový materiál rozdělení zrna takové, aby vyrobené skořepiny měly rovnoměrnou tloušťku, a to i na hranách, vyhovující pevnost a prodyšnost. [2]



Obr. 17 Fluidní posypávání [10]

### 4.3.4 Sušení nebo chemické vytvrzování

#### 1) Sušení

Obaly tuhnou buď jen odpařením disperzního prostředí z kapalného pojiva, které vyvolá stavovou změnu solů v gel, nebo vyvoláním této změny chemickými činidly a teprve pak odpařením disperzního prostředí z pojiva.

Podstatou tvrdnutí obalů sušením je odpařování disperzního prostředí, čímž se koloidní částice přibližují. Jakmile zaujmou polohu nejmenší energie, klesne potenciál elektrické dvojvrstvy na tzv. kritickou hodnotu a sol se ihned změní v gel. [2]

Při procesu sušení keramických skořepin musí každý obal schnout za konstantních podmínek, tzn. v klimatizovaném prostředí po dobu 2-4 hodin, za teploty 20 °C ( $\pm 1$  °C) a relativní vlhkosti 30-60 %. Při sušení musí být také zajištěno dostatečné proudění vzduchu. Podstatného zkrácení doby sušení lze dosáhnout sušením v proudu vzduchu s rychlostí proudění alespoň 180 m/min. V mírně ohřátém vzduchu (25-27 °C), proudícím rychlostí 250 m/min, lze zkrátit

dobu sušení mezi jednotlivými obaly na 50-55 sekund. Uvedené hodnoty se mohou lišit v závislosti na pořadí obalu, typu obalové břečky. [10], [8]

## 2) Chemické vytvrzování

Obaly z keramické břečky připravené z pojiv na bázi alkoholu, lze urychleně sušit chemickým vytvrzením. Posypané obaly se suší krátkou dobu volně na vzduchu, poté se vystaví na krátkou dobu účinkům amoniaku (plynného čpavku). Následuje odstranění čpavkových par z obalu proudem vzduchu nebo vakuováním, nové namočení, odkapání, posypání atd., až má skořepina potřebnou tloušťku. Pak se suší podle rozměrů skořepiny 3-8 hodin. Vytvrzováním pomocí amoniaku dochází kromě zkrácení doby potřebné k vytvoření dostatečně tlusté skořepiny také k nižší spotřebě pojiva. [2]

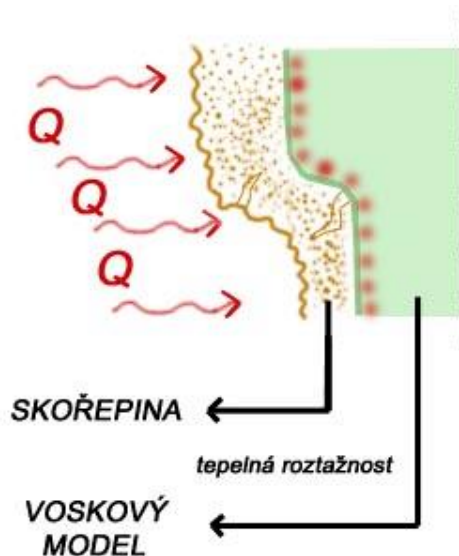
Dále je tato problematika popsána v kapitole 5.4.



Obr. 18 Sušení skořepinové formy [16]

## 4.4 Vytavování vosku

Po nanesení posledního obalu a dokonalém usušení skořepiny se musí nejčastěji voskový model odstranit. To se provádí vytavováním, které je založené na nízké teplotě tavení vosků (60-90 °C). Základním problémem u vytavování voskových modelů je rozdílná tepelná roztažnost vosku a skořepiny. Tepelná roztažnost vosku je vyšší než skořepiny, a proto při vytavování hrozí roztažením voskového modelu roztržení či popraskání skořepiny. Je tedy nutné, aby se vytvořila dilatační spára (vrstva tekutého vosku na hranici mezi formou a voskovým modelem), jež umožní modelu volně dilatovat bez porušení skořepiny. Právě proto se zde aplikuje rychlý ohřev, metoda tzv. tepelného šoku (obr. 19). [1], [2], [3], [8]



Obr. 19 Metoda Tepelného šoku (rychlý ohřev) [8]

Mezi nejpoužívanější technologie pro vytavování vosku patří:

### 1) Vytavování za vysoké teploty

Tato metoda je také nazývána metodou vyžihání (flash fire). Obalené stromečky jsou vloženy do pece s minimální teplotou 750 °C, pracovní teplota je 900 až 1000 °C. Vosk je při této teplotě vytaven, zároveň však dochází také k vypálení skořepiny. Vytavování i vypalování trvá 15 až 25 minut. Tato technologie se již příliš nepoužívá z důvodu 10 až 15 % ztrát vosku a jeho částečnému znehodnocení. [2], [3], [8]

### 2) Mikrovlnným ohřevem

Skořepiny zvlhčené vodou se umístí do mikrovlnného pole. Vlhká skořepina se rychle ohřeje, vosk se těsně u skořepiny odtaví a vytvoří se dilatační spára, která umožní rozpínání modelu bez popraskání skořepiny. Tato metoda je stále vyvíjena a testována. Její velkou výhodou je možnost zařazení do automatické linky. [1], [2]

### 3) Přehřátou parou v bojlerklávu

V současné době se jedná o nejpoužívanější metodu vytavování voskového modelu. Vytavení je zajištěno ohřevem sytou vodní párou za zvýšeného tlaku v uzavřených tlakových nádobách. Obvykle se pracuje s tlaky 0,6 až 0,8 MPa při teplotě 160 až 170 °C. Velice důležitá je doba nárůstu tlaku na pracovní tlak, protože při pomalém ohřevu modelu by mohlo dojít k protržení skořepiny. U zařízení, která jsou používána v praxi, je to 4 až 5 sekund. Doba vytavování je 5 až 25 minut. Mezi největší výhody této technologie patří: [2], [8]

- ideální vlastnosti páry pro přenos tepla
- snadnost sběru vytaveného vosku

- vysoká účinnost (malé ztráty na modelovém vosku, malé množství popraskaných skořepin)
- možnost práce s tenkými skořepinami
- vysoká kvalita povrchu odlitků

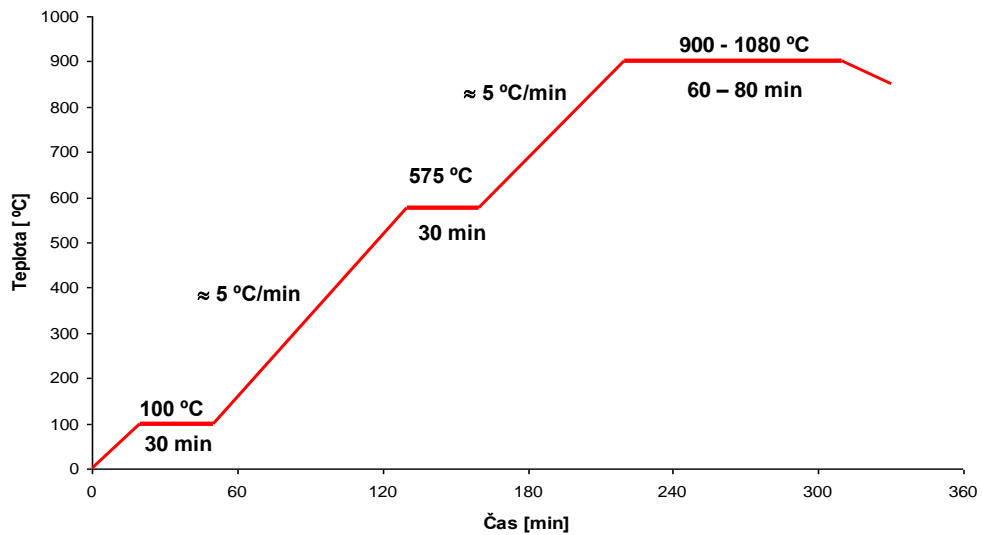


Obr. 20 Ukázka bojlerklávu [17]

#### 4.5 Keramizační žíhání skořepiny

Žíhání skořepiny slouží k převedení amorfni formy vazné vrstvičky  $\text{SiO}_2$  na formu krystalickou, při současném odstranění všech těkavých látek (zbytky vosku). Teplota žíhání bývá v rozmezí 900 až 1000 °C pro  $\text{SiO}_2$ , pro molochit, korund aj. jsou teploty vyšší – 1200 až 1400 °C. [8]

Pracovní teplota, na kterou se skořepiny ohřívají, se řídí charakterem použitých pecí a vlastnostmi skořepin, které závisí na jejich složení. Samotný ohřev při žíhání probíhá s určitými prodlevami. Rychlost ohřevu je obvykle 5 až 6 °C za minutu. První prodleva trvající 30 minut nastává při 100 °C, kdy dochází k odpaření alkoholové složky a vody obsažené v pojivech. Pro úplné odstranění všech nežádoucích složek je potřeba žíhat na teploty kolem 1000 °C. Následuje ohřev již uvedenou rychlostí až na teplotu přibližně 575 °C. Zde dochází k objemovým změnám a je nutná 30minutová prodleva, aby se zamezilo vzniku deformací nebo trhlin. Následuje ohřev stejnou rychlostí až na konečnou teplotu, na níž skořepiny setrvávají 60 až 80 minut. Během této prodlevy se zlepšují vlastnosti formy. [1], [2]



Graf 3 Příklad postupu žíhání skořepinové formy [8]

Vyžíhané formy jsou schopny odolávat velmi vysokým teplotám a při pečlivém výběru skladby keramické břčky a posypového materiálu mohou být používány pro velmi širokou oblast slitin.

Hlavní důvody žíhání skořepinových forem před odléváním: [10]

- odstranění zbytků voskových materiálů a těkavých látek zbylých po vytavování
- ztuhnutí struktury keramiky – dosažení potřebné pevnosti skořepiny
- přehřátí formy před litím na stanovenou teplotu (850 až 1150 °C)



Obr. 21 Průběžná žíhací pec [10]

## 5 VADY SOUVISEJÍCÍ SE SKOŘEPINOVOU FORMOU

### 5.1 Problematika čištění voskových modelů

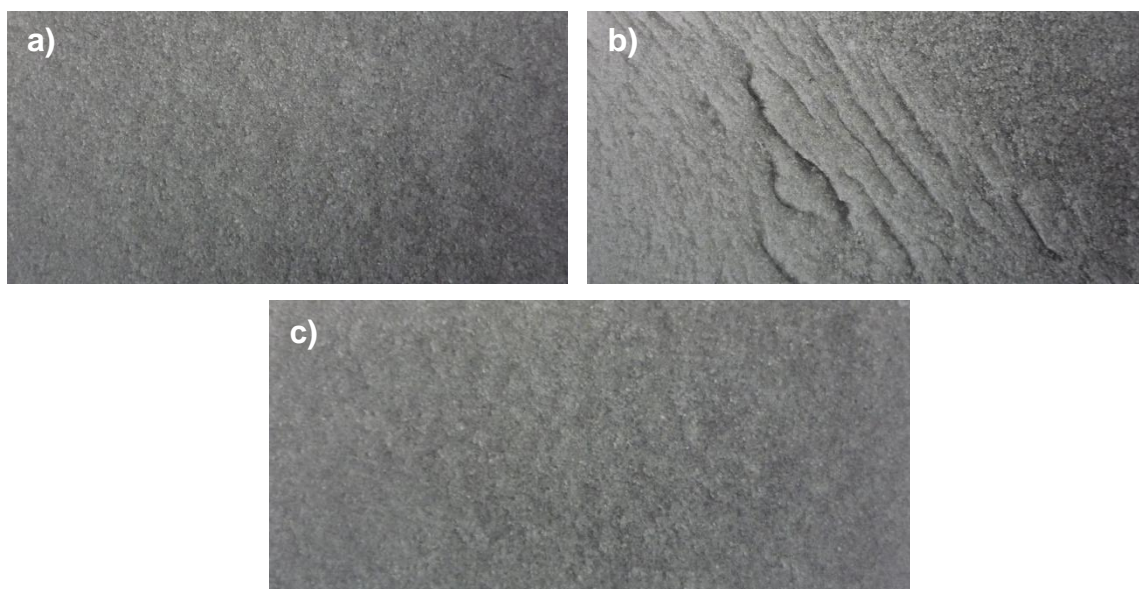
Proces čištění voskových modelů a použití leptadel se v posledních letech změnil. V minulosti nebyl model považován za připravený k obalování, pokud povrch nebyl viditelně naleptán. V dnešní době slévárny někdy modely připravují bez čistícího cyklu a pouze je opláchnou vodou, čímž jsou však odstraněny pouze látky rozpustné ve vodě. Další techniky používají pro čištění čistící prostředky. Zákaz používání starých rozpouštědel jako jsou trichlorethylen a freon, vedl k používání výhradně ve vodě rozpustných čistících prostředků.

Úkolem čištění voskových modelů je odstranění nečistot, silikonových činidel a voskových částic, které mohou způsobit vznik vad během procesu výroby skořepiny. Často je požadováno mírné naleptání modelu, čímž se na povrchu vytvoří mikroskopické nerovnosti, které zlepší přilnavost keramické suspenze a je možné docílit odlitků s velmi kvalitním povrchem. Naleptání také pomáhá zabránit vzniku vydutí u primárního obalu skořepiny, zejména na velkých rovných plochách. Pokud je naleptání příliš hluboké, je drsný povrch modelu převeden na odlitek. Kromě toho také použití zaprášených vosků ovlivňuje keramický obal.

Nejlepší pokrytí voskového modelu získáme odstraněním silikonových nečistot, udržováním správné koncentrace zvlhčení a anti-pěnicích přísad v suspenzi. Tím se dosáhne nejkvalitnějších keramických skořepin a nejhladších povrchů odlitků.

Při použití jakéhokoliv čistícího systému, je nutné sledovat denní účinnost čištění, z důvodu určení správné koncentrace. Hlavní kontrola je soustředěna na dobu ponoření modelu do čistícího prostředku. Snahou je získat čistý voskový model, v co nejkratší době.

Je důležité, aby byl voskový model důkladně opláchnut od čistících prostředků, protože každé přenesení čistícího prostředku do keramické břečky může destabilizovat v pojivu obsažený koloidní oxid křemičitý. To způsobuje nekonzistentnost a také změnu viskozity břečky. [23]



Obr. 22 Ukázka naleptaných povrchů: a) nedostatečné naleptání, b) příliš velké naleptání, c) ideální naleptání [23]

### 1) Příliš velké naleptání modelů

Pravděpodobná příčina:

- a) Příliš dlouhá doba čištění modelu.
- b) Nevyhovující rozpouštěcí směs.
- c) Model není včas opláchnut.

Doporučené řešení:

- a) Zkrátit dobu čištění.
- b) Dodržovat správné kontrolní postupy.
- c) Opláchnout model ihned po vyjmutí z čistícího prostředku. [23]



Obr. 23 Povrch odlitku po příliš velkém naleptání povrchu modelu [23]

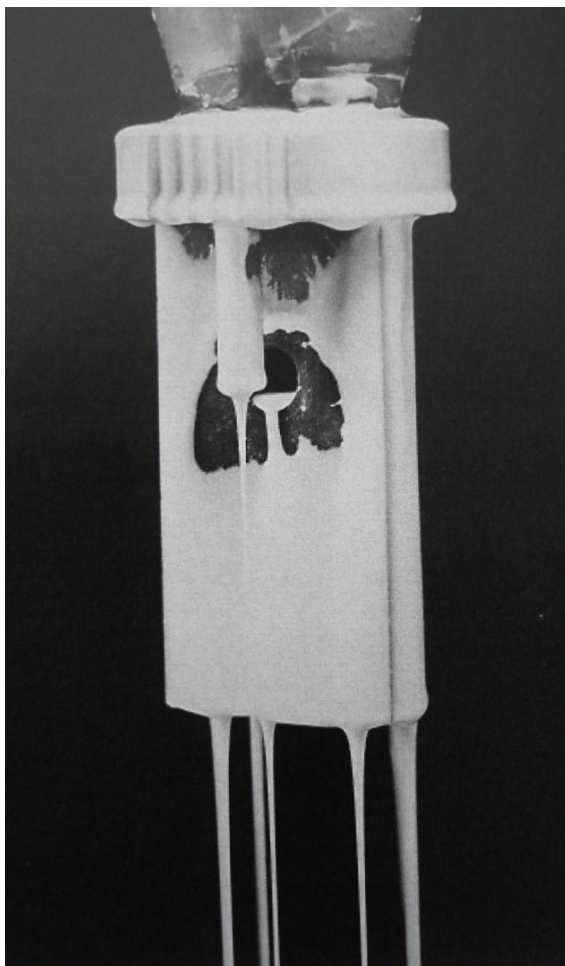
### 2) Nedostatečné naleptání modelů (Špatná smáčivost)

Pravděpodobná příčina:

- a) Nesprávné očištění, popř. naleptání.
- b) Nedostačující smáčedlo v primární suspenzi.
- c) Nadměrné množství separačních činidel.
- d) Nedostatečně čistý model po opláchnutí.

Doporučené řešení:

- a) Kontrolovat účinnost čistícího roztoku. Použít vhodné kontrolní metody nebo použít standartní model.
- b) Postupovat dle doporučení výrobce pro získání správných hodnot. Vyhnout se použití přebytku (pěna). Kontrolovat výběr smáčedla a jeho stabilitu, rozpustnost či disperzi.
- c) Školit obsluhu k používání menšího množství činidel.
- d) Očistit model. [23]



Obr. 24 Stékání břechky po nedostatečném naleptání modelu [23]

## 5.2 Problémy spojené s přípravou keramické suspenze

Keramické břechky nesmí být připravovány v obalovacích nádržích. Měly by být připravovány v samostatných nádržích. Čerstvě namíchaná břechka obsahuje velké množství vzduchových bublin. Ty se do břechky dostávají jednak z povrchu žáruvzdorných materiálů a také z pórů zrnitých přísad. Jakmile se do pojiva nasype moučka a zrna se smísí s pojivem, je uvolněn vzduch. Tento vzduch je potřeba odstranit před tím, než je břechka schopna získat maximální pevnost a dosáhnout stabilní viskozity. Je vhodné, aby byla břechka míchána s dostatečným předstihem, než bude použita pro stavbu skořepiny.

Pro přípravu keramické suspenze se používají rotační nádrže. Ty jsou účinné při udržování rozptýlení moučky v břechce, ale jsou relativně nedostatečné ve smáčení moučky. Pro získání dostatečně vlhké břechky se doporučují vrtulové mísiče a míchací zařízení s vysoce torzním výkonem. [23]

Následující postupy jsou doporučeny pro získání kvalitní keramické suspenze: [23]

- Pečlivě vážit a měřit správné množství pojiva a plniva (moučky).
- Přidávat komponenty pojiva do mísící nádrže.

- Zapnout mísič a pomalu přidávat moučku. Pokud se použijí dva nebo více různých typů žáruvzdorných mouček, jako první se přidá moučka, která má horší smáčivost. Poté se přidá zbývající moučka. Viskozita je nejprve vysoká kvůli vysokému obsahu vzduchu, který je ale postupně eliminován.
- Po přidání všech mouček je břečka pomalu míchána tak, aby nevznikalo víření, dokud nebude eliminován všechen vzduch z břečky a ta se nestane stabilně viskózní. To může trvat 24 až 48 hodin.
- Úpravu břečky na požadovanou viskozitu můžeme docílit přidáním více pojiva nebo moučky (lepší je udělat břečku o něco viskóznější a poté upravit pojivem, než přidávat moučku obsahující další vzduch).
- Poté co je viskozita břečky stabilní (konstantní), může být přesunuta do obalovací nádrže.
- U lícních břeček se přidá povrchově aktivní látka, poté co již břečka neobsahuje žádný vzduch.
- Odpěňovadlo se obvykle přidává v poloviční koncentraci smáčedla. Tyto přísady jsou obvykle předmíchány ve vodě pro lepší míchání.
- Je možné přidat vodu, pokud je to z důvodu odpařování nezbytné.

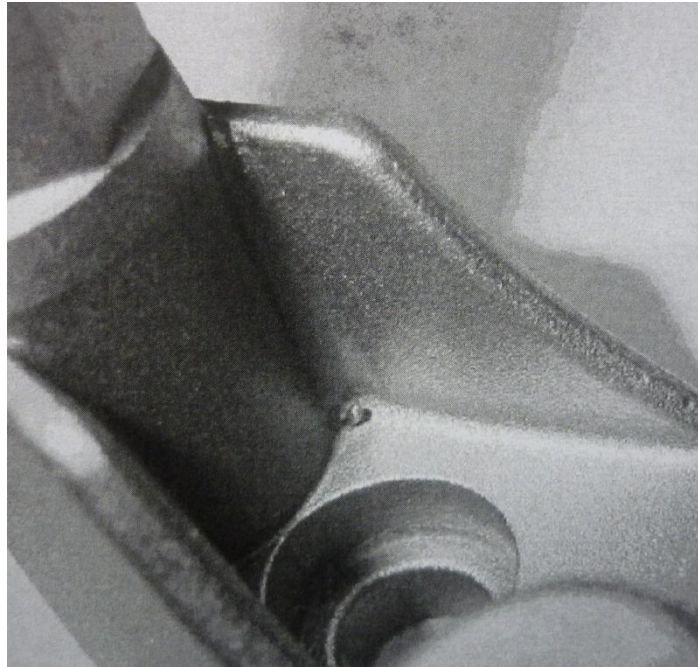
### 1) *Bubliny (Bubbles)*

Pravděpodobná příčina:

- a) Špatné smáčení (špatné smočení v rozích).
- b) Břečka má příliš vysokou viskozitu.
- c) Nesprávné postupy namáčení nebo mechanické zachytávání vzduchu.
- d) Nesprávné namáčení nebo odkapávání.

Doporučené řešení:

- a) Postupovat dle doporučení výrobce pro získání správných hodnot.
- b) Snížit viskozitu břečky nebo použít předmáčení.
- c) Hledat bubliny před posypáváním a odstranit je. Při použití více břeček odstranit bubliny mezi jednotlivými operacemi namáčení. Zpomalit vynořování. Dodržovat správnou orientaci, aby se zabránilo uvíznutí vzduchu. Použití vakuových metod k odstranění vzduchu a bublin.
- d) Použít správné pohyby při odkapávání, aby se zabránilo vzniku bublin. [23]



Obr. 25 Vzduchová bublina v rohu odlitku [23]

## 2) Průnik posypu a další problémy způsobené hrubým povrchem

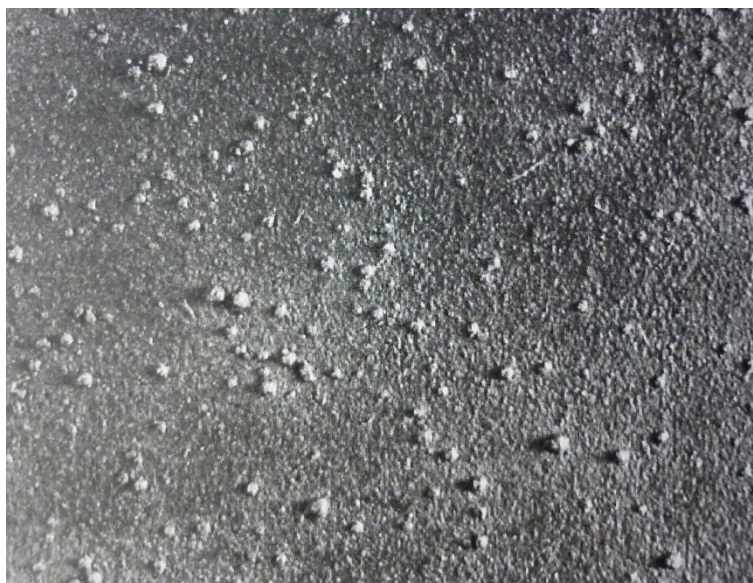
Pravděpodobná příčina:

- a) Vrstva břechky je příliš tenká.
- b) Čas odkapání před aplikací posypu je příliš dlouhý.
- c) Posyp je příliš hrubý.
- d) Sprchový posypávač je příliš vysoko nad modelem.
- e) Sprchový posypávač nezajišťuje jednotný posyp.
- f) Nesprávné proudění vzduchu ve fluidním posypávači.
- g) Pěnění suspenze.
- h) Neúplné smočení žáruvzdorného materiálu během přípravy nebo úpravy břechky.
- i) Nestabilní břечka (mikrogel).
- j) Interakce mezi formou a odlévaným kovem.

Doporučené řešení:

- a) Použít břечku s vyšší viskozitou.
- b) Optimalizace času odkapání. Školení obsluhy.
- c) Použít jemnější posyp.
- d) Zmenšit výšku, ze které padá posyp na model.
- e) Údržba nebo revize zařízení.
- f) Snížit proudění vzduchu podle potřeby, udržovat posypávač čistý. Udržovat dostatečné proudění vzduchu, aby se předešlo silovému působení na model při vkládání do posypávače.
- g) Viz výše uvedená doporučení pro přípravu břechky.
- h) Viz kapitola 4.1.4 Kontrola a testování keramické suspenze.

- i) Lépe regulovat teplotu kovu. Primární obal potřebuje materiál s více žáruvzdorným materiálem. [23]



Obr. 26 Povrch odlitku po průniku posypu [23]

### 5.3 Udržování keramické suspenze a posypu

Obvykle je voda nebo rozpouštědla přidána za účelem udržet stálou pracovní viskozitu. Pokud zůstává měrná hmotnost konstantní na jednotné viskozitě, relativní poměr pojiva a žáruvzdornin zůstává také konstantní. Pokud měrná hmotnost kolísá, zatímco viskozita zůstává konstantní, je tím indikována nestabilita břečky. Úpravu pH u břeček na vodní bázi lze provést přidáním hydroxidu amonného, který nemá žádný dopad na žáruvzdornost skořepiny. Pokud žáruvzdornost skořepiny není problematická, je možné použít 2,5% roztok hydroxidu draselného. Pokud je použit hydroxid draselný, je nutné ho přidávat pomalu za silného míchání, aby se zabránilo lokální gelaci. [23]

#### 1) „Přemostění“ (Bridging Defects), průnik odlévaného kovu

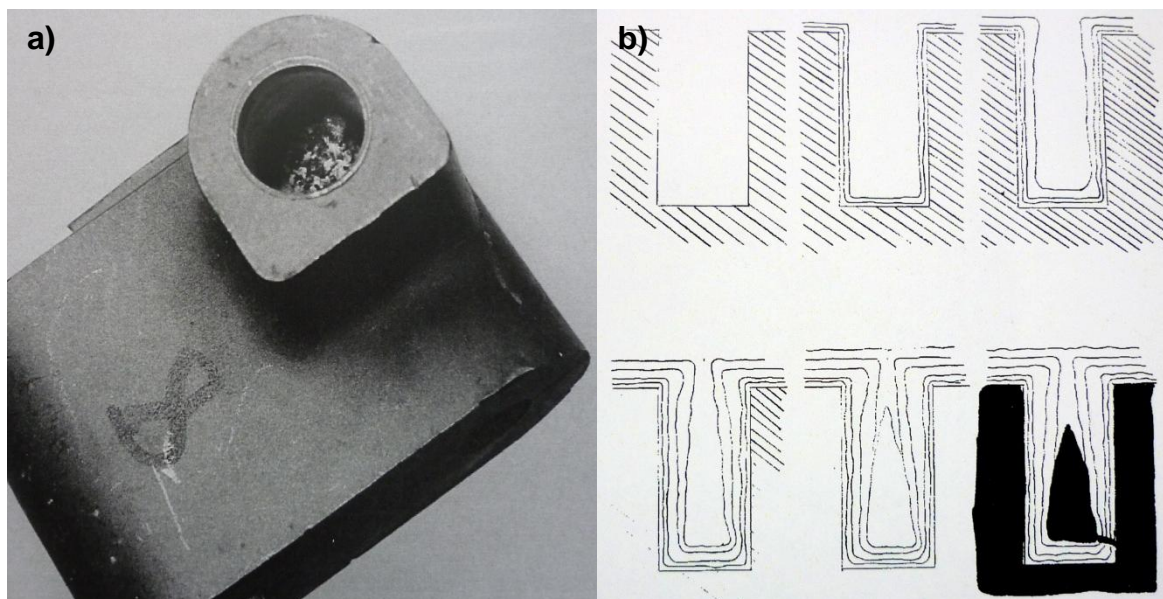
Pravděpodobná příčina:

- Přebytek nebo uvolnění posypu v díře či drážce.
- Posypový materiál je příliš velký.
- Posyp obsahuje hrudky.
- Sušení v dírách nebo drážkách je nedostatečné.
- U druhého popř. dalšího namáčení je problém s vysokou viskozitou.
- Nesprávná orientace dílu (zvláště u robotů) vede k velkému usazování břečky v drážkách a otvorech.

Doporučené řešení:

- Odstranit veškerý uvolněný posypový materiál.
- Použít menší posyp.

- c) Odstranit hrudky z posypu.
- d) Zvýšit dobu schnutí.
- e) Zavést předmáčení nebo snížit viskozitu břečky.
- f) Změnit orientaci dílu. [23]



Obr. 27 „Přemostění“, průnik odlévaného kovu: a) vadný odlitek, b) vznik vady [23]

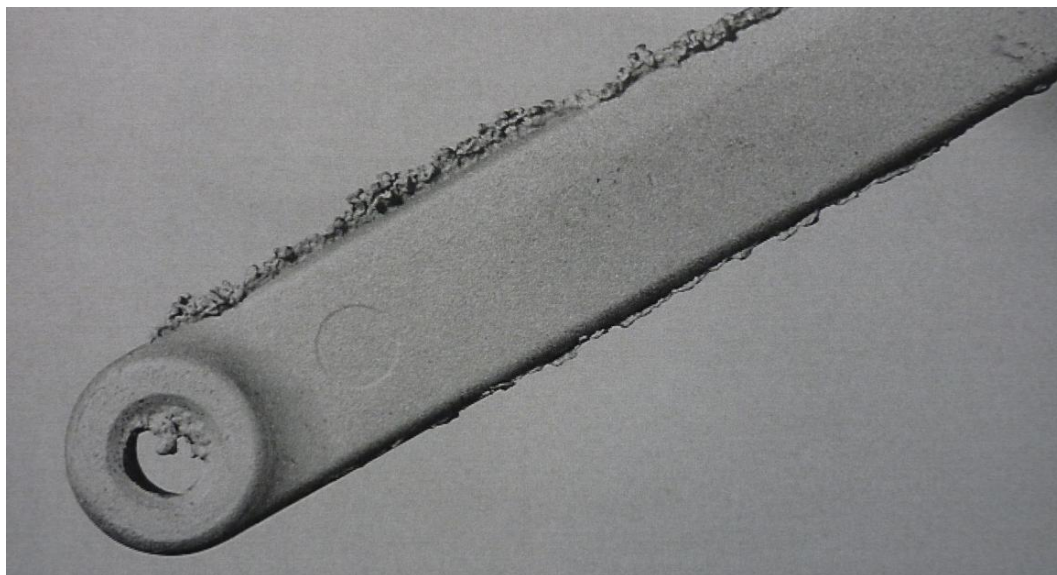
## 2) Praskání skořepiny, vznik švů a zateklin (Shell Cracking, Finning)

Pravděpodobná příčina:

- a) Vosk se zahřívá předešlým autoklávováním, rozšiřuje se a trhá skořepinu.
- b) Nárůst tlaku v autoklávu je příliš pomalý.
- c) Pevnost v nevyžíhaném stavu je nepřiměřená k této části.
- d) Zkapalněný vosk nemůže odtékat.
- e) Nedostatečné sušení.

Doporučené řešení:

- a) Udržovat stálou teplotu ve formě až těsně do vytavení vosku. Poté uložit formu do autoklávu, který je uzavřen a zajištěn. Následuje aplikace tlakového působení.
- b) Je nutné dosáhnout maximálního tlaku v deseti či méně sekundách.
- c) Zesílit skořepinu pomocí extra namáčení. (Pokud se tloušťka zdvojnásobí, lokální pevnost se zčtyřnásobí)
- d) Zkontrolovat bod tání voskového vtoku, měl by být nižší než modelu.
- e) Dostatek času pro vysušení před vytavením vosku. [23]



Obr. 28 Zateklina na obvodu odlitku [23]

#### 5.4 Problémy spojené se sušením skořepiny

Vosky se rozpínají a smršťují mnohem rychleji než materiály použité pro výrobu skořepin. Z tohoto důvodu musí být v autoklávu zajištěn rychlý nárůst tlaku, aby se vosk začal rozpouštět dříve, než dojde k jeho expanzi a možnosti rozlomení skořepiny.

Stejně tak ale může vosk způsobit praskání skořepiny během sušení. Účinky rozdílné roztažnosti je proto důležité brát v potaz. Když je skořepina vysoušena, dochází k ochlazování voskového modelu, který má tendenci se mírně smršťovat. Tento chladící účinek končí s vypařením vody ze skořepiny. Teplota vosku se vrací na pokojovou teplotu. Skořepina se nerozpíná tak rychle jako vosk a může být rozlomena kvůli silovému namáhání od rozpínajícího se vosku. [23]

Správné podmínky sušení:

##### a) Relativní vlhkost vzduchu

V prostředí, kde se provádí namáčení a primární sušení, by měla být relativní vlhkost nad 50 % (možné je až 60 %). Čím tenčí je díl, tím kritičtější je hodnota relativní vlhkosti. Tenký díl se může rozpínat snadněji než díl velký a silný. Jakmile je aplikován jeden nebo dva zesilovací obaly, izolační efekt skořepiny umožňuje použít nižší relativní vlhkost z důvodu rychlejšího sušení. Volba relativní vlhkosti je vždy kompromisem mezi rychlostí sušení a rizikem praskáním skořepiny. Čím vyšší je relativní vlhkost, tím nižší je možnost prasknutí skořepiny, ale zase pomalejší rychlost sušení.

Použitím polymerů v primárních obalech dojde ke zvýšení pružnosti a pevnosti těchto obalů a lze také připustit nižší relativní vlhkost při sušení. Někdy lze relativní vlhkost snížit až na 35 %, obecně se to však nedoporučuje. [23]

### **b) Teplota**

I bez chladících účinků sušení je potřeba dodržovat správnou hodnotu teploty ve výrobním prostředí skořepiny. Teplotní výkyvy způsobují rozpínání vosku ve skořepině, což vede k jejímu poškození. Proto je nutné kontrolovat teplotu 24 hodin denně. Rychlost sušení roste se vzrůstající teplotou a to nezávisle na hodnotě relativní vlhkosti. [23]

### **c) Proudění vzduchu**

Po celou dobu sušení je nutné zajistit nepřetržité proudění vzduchu. Při sušení primárních obalů se doporučuje vyhnout přímé srážce proudícího vzduchu se skořepinou nebo ji omezit na minimum. Proudění vzduchu kolem skořepiny by mělo být asi 0,5 až 1 m/s.

Při sušení zesilovacích obalů může být proudění vzduchu výrazně vyšší a to 2,5 až 5 m/s. Je však nutné zajistit ze všech stran stejné proudění vzduchu na formu. [23]

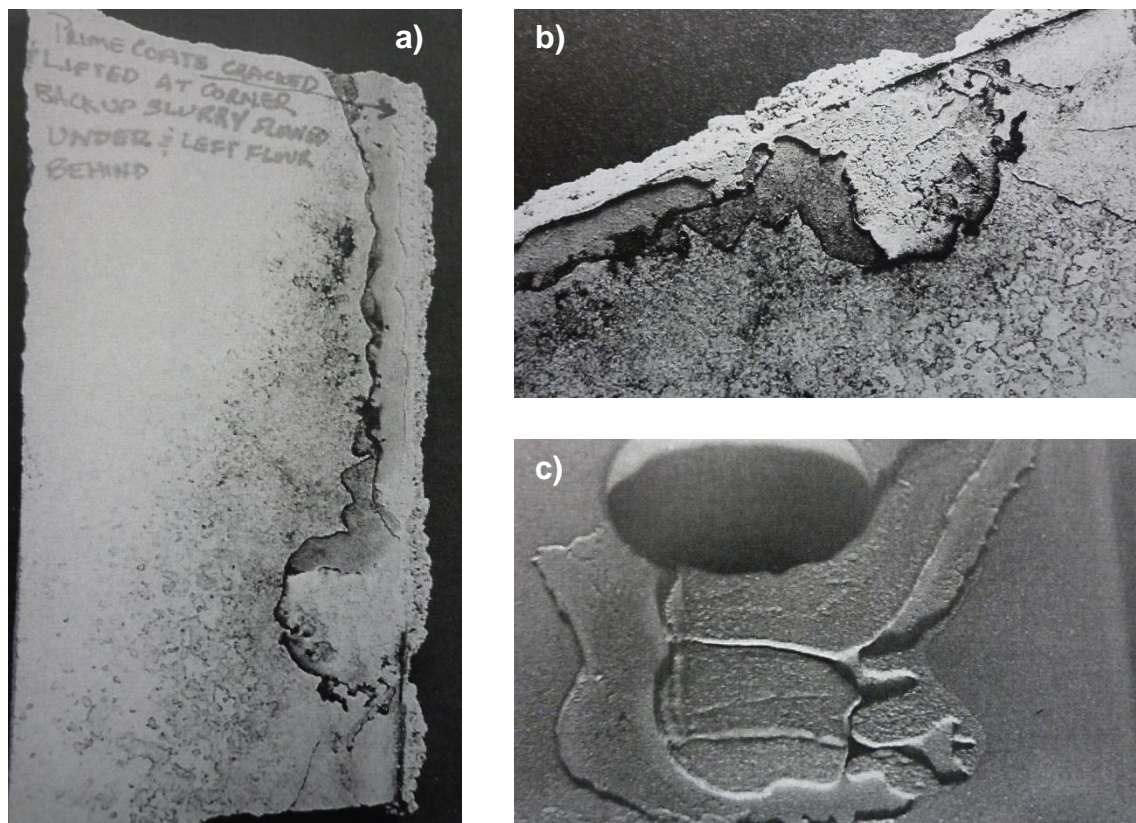
## **1) Odloupení primární vrstvy (Prime Coat Lift)**

Pravděpodobná příčina:

- a) Špatná přilnavost primárního obalu k modelu.
- b) Přesušení vnějších ploch primárního obalu.
- c) Nedostatečné vysušení vnitřních ploch primárního obalu.
- d) Slabost v ostrých rozích.
- e) Teplotní výkyvy.

Doporučené řešení:

- a) Zlepšit proces čištění (naleptání) modelu.
- b) Zvýšit relativní vlhkost. Použít minimální čas pro zabránění oddělení skořepiny od vosku. Minimalizovat rychlost proudění vzduchu. Přidat přísady zlepšující pevnost v nevyžíhaném stavu. Vyhnout se předmáčení před druhým obalem.
- c) Snížit relativní vlhkost. Prodloužit dobu sušení. Zajistit správnou cirkulaci vzduchu kolem těchto ploch. Vyhnout se předmáčení před druhým obalem.
- d) Změnit techniku namáčení a odkapávání kvůli odstranění břečky, která se hromadí v rozích.
- e) Udržovat stálou teplotu. [23]



Obr. 29 Odloupení primární vrstvy: a), b) Poškozená skořepina, c) Způsobená vada na odlitku [23]

## 2) Odlupování (Spalling)

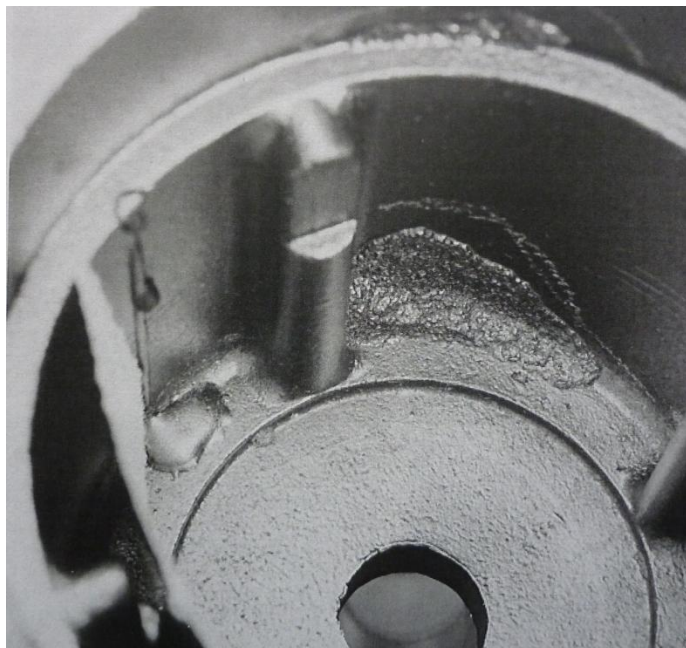
Pravděpodobná příčina:

- a) Nedostatečná adheze mezi obaly, protože:
  - Přebytek posypového materiálu brání v propojení obalů.
  - Viskozita břečky při druhém namáčení je příliš vysoká (první obal pohlcuje pojivo druhého obalu).
  - Špatné odkapání přebytečné břečky po prvním namáčení.
  - Příliš hrubý posyp.
  - Posypový materiál obsahuje příliš malá zrna (prach a drobné částice nečistot).
- b) Pokud se odloupení objevuje pouze po žíhání, je signalizována rozdílná roztažnost mezi jednotlivými obaly.
- c) Pokud se odloupení objevuje během autoklávování, je signalizována rychlá dekomprese.

Doporučené řešení:

- a) Nedostatečnou adhezi mezi obaly lze odstranit:
  - Odstranit uvolněný posyp.
  - Zavést předmáčení nebo změnit viskozitu břečky.
  - Zlepšit rovnoměrnost odkapání.

- Zvážit střední velikost posypového materiálu.
  - Odstranit příliš malá zrna (prach a drobné částice nečistot) z posypového materiálu.
- b) Zpomalit ohřev. Změnit žáruvzdorný materiál za lepší.
- c) Uvolňovat tlak postupně. [23]



Obr. 30 Vada na odlitku způsobená odloupením primárního obalu [23]

## 5.5 Problémy spojené s vytavování vosku

### a) Vytavování v autoklávu

Úspěšné vytavení vosku v autoklávu závisí na rychlosti, kterou je vosk ze skořepiny odstraněn. Jak již bylo zmíněno, vosk má mnohem větší tepelnou roztažnost než keramická skořepina, a pokud bude teplota a rychlost vytavování příliš nízká, hrozí prasknutí skořepiny. Vosk však špatně vede teplo. V případě, že je teplo dodáno k povrchu dostatečně rychle, vosk začne dříve tát než se rozpínat.

Skořepiny by měly být vloženy na manipulační vozík a do autoklávu co možná nejrychleji. Není vhodné nechávat skořepiny v autoklávu příliš dlouho, protože je v něm obvykle vyšší teplota než v jeho okolí. Jakmile je vozík se skořepinami v autoklávu, musí být dvířka uzamčena a pára vpuštěna co nejdříve.

Většina moderních autoklávů dosáhne tlaku přibližně 0,7 MPa za 10 sekund nebo méně, což je dobré pro minimalizaci praskání skořepin. V případě starších autoklávů, které nedosáhnou 0,7 MPa, je snadou dosáhnout 0,55 MPa do 8 sekund nebo alespoň 0,4 MPa během 6 sekund. Pokud autokláv nedosáhne těchto tlaků v daných časech, je nutné zvážit přidání zásobníku mokré páry do systému nebo koupi nového vyvíječe páry.

Na konci vytavovacího cyklu je stejně důležité, aby byl pokles tlaku pomalý. Příliš rychlé snížení tlaku může způsobit vznik vody ve skořepině, která má

za následek oddělení jednotlivých vrstev nebo praskání formy. Snížení tlaku by mělo trvat přibližně 2 minuty.

U forem s hustým obalem, s nízkou pórovitostí povrchu, s vysokým bodem tání vosku nebo s vysoce viskózním voskem je vytavení modelu obtížnější. Zde se často s výhodou využívá vtoku, který je vyroben z vosku s nižší teplotou tání než samotný model. Vosk vtoku se tak roztaví a vyteče jako první, čímž se uvolní cesta pro vosk modelu. Voskové vtoky s nízkým bodem tání lze obalovat ještě před připojením modelů. [23]

### **b) Vytavení vosku vyžiháním**

Při vytavení vosku vyžiháním je studená forma vložena přímo do pece předeřháté na doporučenou teplotu 850 °C. Příliš nízká teplota (pod 650 °C) může vést k neúplnému vytavení vosku a zanechat popeloviny.

Stejně jako v případě autoklávu by měly být formy udržovány při pokojových podmínkách, až do doby těsně před vyžiháním, aby se zabránilo rozpínání vosku. Formy musí být dokonale suché. Rychlé vypaření zbylé vlhkosti může způsobit oddělování jednotlivých vrstev obalu.

U vytavení vosku vyžiháním je přívod tepla pomalejší než v případě autoklávu s párou. Proto je velice důležité sledovat nízkou pórovitost povrchu obalu a vysoký bod tání vosku. [23]

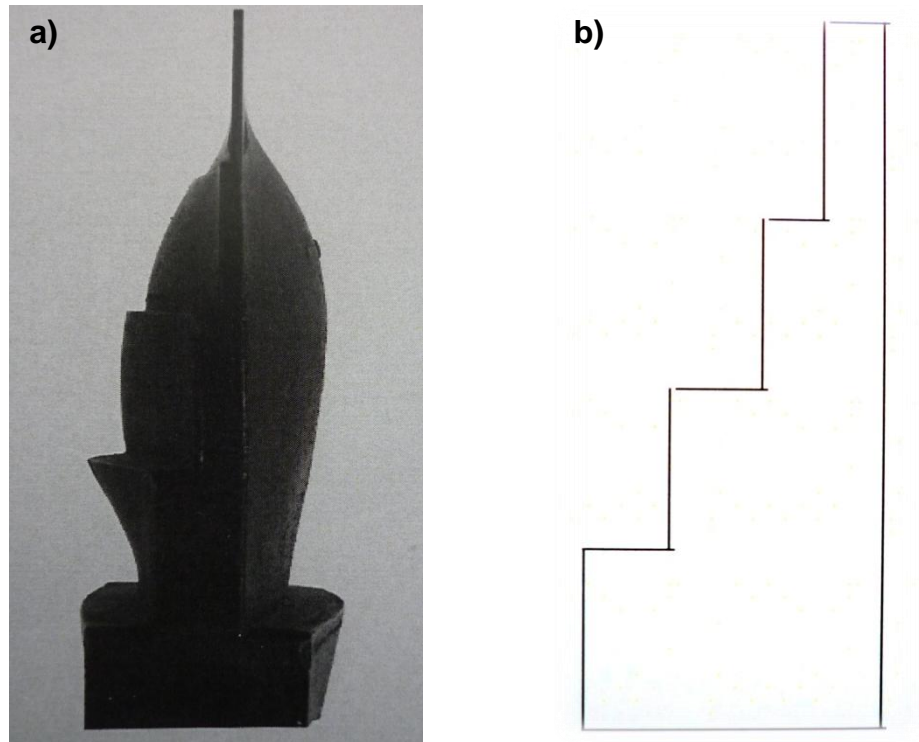
### **1) Vyboulení způsobené přehřátím**

Pravděpodobná příčina:

- a) Teplota vyžihání je příliš vysoká.
- b) Žáruvzdornost použitého materiálu je nedostatečná.
- c) Teplota odlévaného kovu je příliš vysoká.
- d) Tlak odlévaného kovu je příliš vysoký.
- e) Nedostatečný rozvod tepla.
- f) Rozlehlé povrchy.

Doporučené řešení:

- a) Snížit teplotu žihání.
- b) Zvolit lepší žáruvzdorné materiály.
- c) Zlepšit regulaci teploty.
- d) Snížit metalostatickou výšku.
- e) Použít žáruvzdorný materiál, který více rozvádí teplo a chová se méně jako izolant.
- f) Přidat vyztužující prvek. [23]



Obr. 31 a) Změna tvaru vosku přehřátím, b) Obrys původního tvaru [23]

## 2) Oddělování zesilovacích obalů

Pravděpodobná příčina:

Rychlé snížení tlaku v autoklávech způsobuje vniknutí páry mezi jednotlivé vrstvy obalu.

Doporučené řešení:

Snížit tlak pomalu. [23]



Obr. 32 Oddělení jednotlivých vrstev obalu [23]

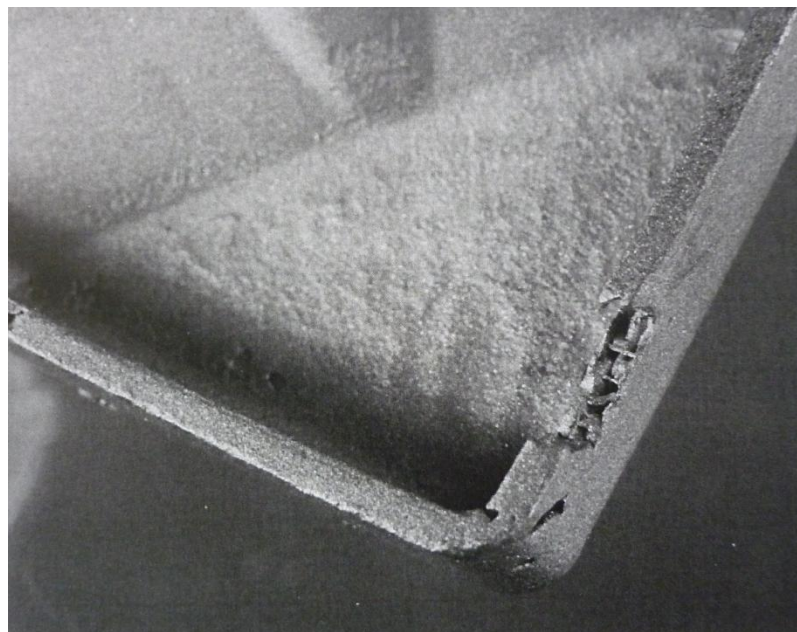
### 3) Vměstky (Inclusions)

Pravděpodobná příčina:

- a) Špatné vyčištění – volný žáruvzdorný posyp ve skořepině.
- b) Model je nesprávně připojen ke vtoku.
- c) Odlupování, oddělování vrstev, trhliny.
- d) Opravná technika může zanést keramiku.
- e) Poškozený filtr.

Doporučené řešení:

- a) Vypláchnout skořepinu. Skladovat licí jamkou dolů. Vyfouknout skořepinu těsně před vyžiháním. Otřít okraj před otáčením.
- b) Modely připojit ke vtoku vhodnou technikou.
- c) Viz výše popsaná vada oddělování zesilovacích obalů.
- d) Zavést postupy, které minimalizují problém.
- e) Zavést postupy, které minimalizují problém. [23]



Obr. 33 Vada odlitku způsobená vměstkem [23]

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat literární rešerši na téma současné trendy ve výrobě keramických skořepinových forem. Práce je zaměřena především na používané suroviny a postupy, které vedou k vytvoření optimální skořepinové formy.

Vzhledem k trendu posledních let, který je ve znamení zvyšujících se nároků na rozměrovou přesnost, použité materiály, dobu výrobního procesu a náklady s výrobou spojené, je nutný neustálý rozvoj této slévárenské technologie. To je spojené s vývojem nových žáruvzdorných materiálů, které se používají jako plniva keramických suspenzí i jako ostřiva. Řada žáruvzdorných materiálů má vynikající vlastnosti, ovšem jejich cena je velmi vysoká. Snahou je proto jejich náhrada materiály, jejichž cena je výrazně nižší, avšak svými vlastnostmi se podobají drahým materiálům. Důležité je také plné pochopení jednotlivých interakcí mezi materiály. Nedostatečné pochopení by vedlo ke špatně fungujícímu a nestabilnímu výrobnímu systému. V dnešní době je také nutná pečlivá kontrola celého výrobního procesu. Do výroby se začleňuje kontrola vstupních surovin, kontrola samotného výrobního procesu a také kontrola výstupní. Z tohoto důvodu je výroba také značně automatizována. Mechanizací dochází ke snížení zmetkovitosti, snížení výrobních nákladů a také ke zrychlení a zkvalitnění celého procesu. Vady, které mohou vzniknout z důvodu zanedbání některé z kontrol nebo z důvodu chybně provedených výrobních postupů, je nutné důkladně zanalyzovat a kvalifikovat. Poté je nezbytné nalézt řešení, které danou vadu z výrobního procesu odstraní nebo alespoň minimalizuje její dopad.

Technologie výroby přesných odlitků metodou vytavitelného modelu, patří mezi jednu z nejstarších a v dnešní době také nejprogresivnějších metod odlévání. Jedná se o velice konkurenceschopnou technologii, která se po nedávné celosvětové finanční krizi (2008-2009) začíná opět naplno rozvíjet.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] BEELEY, Peter R a Robert F SMART. *Investment Casting*. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 0-901716-66-9.
- [2] DOŠKÁŘ, Josef et al. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976, 315 s.
- [3] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno: FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
- [4] WILLIAMS, Ronald, Richard HIRST a Milan HORÁČEK. Přehled světové produkce odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2010, LVIII, 11-12, s. 372-373. ISSN 0037-6825.
- [5] ELBEL, Tomáš. *Základy slévárenské technologie* [online]. Ostrava: FMMI VŠB - TU Ostrava, 2006 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: [http://katedry.fmfi.vsb.cz/632/zaklady\\_slevarenske\\_tehnologie.pdf](http://katedry.fmfi.vsb.cz/632/zaklady_slevarenske_tehnologie.pdf)
- [6] KRACMAN, Ondřej. *Faktory ovlivňující přesnost odlitků u metody vytavitelného modelu* [online]. [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: [http://stc.fs.cvut.cz/History/2008/Sbornik/S3/Kracman\\_Ondrej\\_12133.pdf](http://stc.fs.cvut.cz/History/2008/Sbornik/S3/Kracman_Ondrej_12133.pdf)
- [7] *Prague Cast* [online]. 2009 [cit. 2012-05-12]. Products. Dostupné z: <http://www.praguecast.cz/products.php>
- [8] HORÁČEK, Milan. *Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárství ÚST, FSI VUT Brno, [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>
- [9] *Investacast* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Wax Removal. Dostupné z: [http://www.investacast.com/Portals/0/images/shell\\_moulds.jpg](http://www.investacast.com/Portals/0/images/shell_moulds.jpg)
- [10] PÍŠA, Václav. *Technologie přesného lití metoda vytavitelného modelu* [online]. Praha: Prague Casting Services, [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: [u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/Metoda\\_presneho\\_liti\\_vosk.ppt](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/Metoda_presneho_liti_vosk.ppt)
- [11] FRULLI, Danilo, Maria Cristina DI DAVIDE a Erich SCHMIDT-KLUGE. *Alumina and Silico-Aluminate Refractories: and their role in ceramic mould properties*. Bilbao: EICF meeting, 2006. 39 s.
- [12] BIJVOET, Mark. *Refractories for the Investment Casting Industry and Ceramic Shell Strength*. Cairo: International Seminar CMRDI, 2007. 42 s.
- [13] *Blayson* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Specialist Products. Dostupné z: [http://www.blayson.com/downloads/T60\\_Usage\\_v1\\_1.pdf](http://www.blayson.com/downloads/T60_Usage_v1_1.pdf)

- [14] *FEINGUSS BLANK* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Investment casting. Dostupné z: <http://www.feinguss-blank.de/english/technologies-solutions/casting/investment-casting.html>
- [15] BEDDOW, Jarrad. *Introduction to the Investment Casting Process*. REMET, 2007. 86 s.
- [16] *MK Technology* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Metal investment casting. Dostupné z: <http://www.mk-technology.com/feinguss.html?&L=2>
- [17] *LBBC Technologies* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Downloads. Dostupné z: [http://www.lbbctechnologies.com/content/Core\\_Removal\\_Presentation.ppt](http://www.lbbctechnologies.com/content/Core_Removal_Presentation.ppt)
- [18] HENDRICKS, Mike a Mark, BIJVOET. *Ceramic Shell Preparation and Control*. Cairo: International Seminar CMRDI, 2007. 47 s.
- [19] *Direct Industry* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Products. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/eutech-instruments/benchttop-precision-ph-meters-23595-507576.html>
- [20] *Humboldt: Construction Materials Testing Equipment* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Asphalt. Dostupné z: <http://www.humboldtmfg.com/c-5-p-357-id-5.html>
- [21] *Stanhope-Seta* [online]. 2010 [cit. 2012-05-12]. Viscosity. Dostupné z: <http://www.stanhope-seta.co.uk/1435/Seta-Zahn-Cup-No.-5>
- [22] *Creuzet International* [online]. 2009 [cit. 2012-05-12]. Products. Dostupné z: <http://microscopesindustry.com/images/Specific%20Gravity%20Hydrometer.jpg>
- [23] INVESTMENT CASTING INSTITUTE. *Atlas of shell defects*. 2. vyd. New Jersey, 2007, s.26.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Perseus držící hlavu Medusy [3]  
 Obr. 2 Ukázka odlitků vyráběných technologií vytavitelného modelu [7]  
 Obr. 3 Princip technologie vytavitelného modelu [8]  
 Obr. 4 Keramická skořepinová forma [9]  
 Obr. 5 pH metr [19]  
 Obr. 6 Zahnův [20] a Fordův pohárek [21]  
 Obr. 7 Měření obsahu pevných polymerních látek [15]  
 Obr. 8 24 – hodinový test gelace [15]  
 Obr. 9 Hydrometr [22]  
 Obr. 10 Měření měrné hmotnosti vážením [15]  
 Obr. 11 Detailní snímek zrna zirkonu [11]  
 Obr. 12 Detailní snímek zrn taveného křemene [11]  
 Obr. 13 Detailní snímek zrn taveného mulitu [11]  
 Obr. 14 Obalování pomocí robota [14]  
 Obr. 15 Očištění voskového modelu pomocí přípravku Trisol 60 Plus [13]  
 Obr. 16 Automatizované pracoviště [10]  
 Obr. 17 Fluidní posypávání [10]  
 Obr. 18 Sušení skořepinové formy [16]  
 Obr. 19 Metoda Tepelného šoku (rychlý ohřev) [8]  
 Obr. 20 Ukázka bojlerklávu [17]  
 Obr. 21 Průběžná žíhací pec [10]  
 Obr. 22 Ukázka naleptaných povrchů: a) nedostatečné naleptání, b) příliš velké naleptání, c) ideální naleptání [23]  
 Obr. 23 Povrch odlitku po příliš velkém naleptání povrchu modelu [23]  
 Obr. 24 Stékání břechky po nedostatečném naleptání modelu [23]  
 Obr. 25 Vzduchová bublina v rohu odlitku [23]  
 Obr. 26 Povrch odlitku po průniku posypu [23]  
 Obr. 27 „Přemostění“, průnik odlévaného kovu: a) vadný odlitek, b) vznik vady [23]  
 Obr. 28 Zateklina na obvodu odlitku [23]  
 Obr. 29 Odlopnutí primární vrstvy: a), b) Poškozená skořepina, c) Způsobená vada na odlitku [23]  
 Obr. 30 Vada na odlitku způsobená odlopnutím primárního obalu [23]  
 Obr. 31 a) Změna tvaru vosku přehřátím, b) Obrys původního tvaru [23]  
 Obr. 32 Oddělení jednotlivých vrstev obalu [23]  
 Obr. 33 Vada odlitku způsobená vměstkem [23]

## SEZNAM GRAFŮ

- Graf 1 Přehled světové výroby odlitků metodou vytavitelného modelu [3]  
 Graf 2 Závislost měrné hmotnosti na pevných látkách v pojivu [18]  
 Graf 3 Příklad postupu žíhání skořepinové formy [8]

## SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Fyzikální vlastnosti vybraných žáruvzdorných materiálů [11], [12]