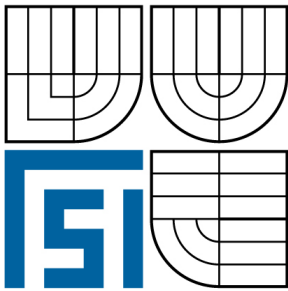


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU V SOUČASNOSTI - PROBLEMATIKA FOREM

PRESENT STATE OF INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY - CERAMIC MOULDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ ŠMÍD

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2009

**ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce si klade za cíl shromáždit základní informace o současné problematice výroby keramických skořepinových forem. Je zaměřena na přehled základních materiálů a nejmodernějších zařízení používaných při jejich výrobě. Dále se práce zabývá možnými problémy, popřípadě defekty, které při výrobě skořepiny mohou nastat.

**Klíčová slova**

Přesné lití, keramická skořepinová forma, vady skořepiny

**ABSTRACT**

This bachelor thesis is focused to the production of ceramic moulds and connected problems during the shelling process. The survey of materials and equipment is given in this work and also possible defects and their causes in the ceramic shells.

**Key words**

Investment casting, ceramic shell mould, shell defects

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠMÍD, J. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti - problematika forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. XY s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Technologie vytavitelného modelu v současnosti - problematika forem vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....  
Jiří Šmíd

## **Poděkování**

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

**OBSAH**

Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	8
1 Technologie přesného lití na vytavitelný model.....	9
1.1 Úvod do technologie.....	9
1.2 Princip výroby a technologie.....	9
1.2.1 Výroba modelu.....	10
1.2.2 Sestavení modelu.....	10
1.2.3 Výroba skořepinové formy.....	10
1.2.4 Vytavení modelu ze skořepiny.....	10
1.2.5 Vytvrzení skořepiny.....	11
1.2.6 Odlévání a dokončovací operace.....	11
2 Keramické Skořepinové formy.....	11
2.1 Základní poznatky skořepinové formy.....	11
2.1.1 Základní požadavky na formy keramické skořepiny.....	11
2.1.2 Současná technologie skořepinové formy.....	12
2.2 Materiály používané pro výrobu keramické skořepiny.....	12
2.2.1 Pojiva.....	12
2.2.2 Druhy pojiv na trhu.....	13
2.2.3 Plniva.....	15
2.2.4 Druhy plniv na trhu.....	15
2.2.5 Přísady používané k výrobě skořepiny.....	17
2.3 Zařízení používané při výrobě skořepinové formy.....	17
2.3.1 Míchací zařízení pro výrobu břečky.....	17
2.3.2 Posypové zařízení na obalování skořepiny.....	18
2.3.3 Zařízení pro vytavení vosku z hotové skořepinové formy.....	19
2.3.4 Zařízení pro vytvrzování skořepinové formy.....	20
2.3.5 Robotizované linky pro výrobu skořepinové formy.....	20
2.4 Defekty a problémy keramické skořepiny.....	21
2.4.1 Problémy přípravy modelu.....	21
2.4.2 Problémy přípravy keramické břečky.....	22
2.4.3 Problémy posypového materiálu a dalších příčin hrubého povrchu.....	24
2.4.4 Problémy vysoušení skořepiny.....	24
2.4.5 Problémy při vytavování vosku ze skořepiny.....	26
Závěr.....	29
Seznam použitých zdrojů.....	30
Seznam příloh.....	31

## ÚVOD

Práce je věnována technologii přesného odlévání na vytavitelný model. Nejprve se zabývá podstatou přesného lití a jejím technologickým procesem při vlastní výrobě. Od začátku výroby voskových modelů, jejich sestavení a výroby skořepinové formy, přes vytavení vosku, vypalování skořepiny, až k vlastnímu odlévání a dokončovacím operacím. Tato část je zde popsána pouze okrajově.

V další části je práce pouze zaměřena na problematiku skořepinové formy. Aby se docílilo v této technologii oné požadované přesnosti, musí i skořepinová forma být vyráběna co nejpřesněji. Na tuto přesnost má vliv spousta faktorů, mezi které patří správná volba materiálů, ze kterých je forma vyráběna. Těchto materiálů existuje celá řada a při jejich použití záleží na tom, jakých vlastností od nich bude požadováno. Dalším ovlivňujícím faktorem v dnešní době je i způsob výroby a proto se používají co nejmodernější zařízení.

Závěr práce je věnován problémům a deformacím, které se vyskytují při výrobě skořepinové formy. Těchto problémů existuje celá řada a jsou způsobeny různými vlivy, kterých se snažíme při výrobě buďto úplně vyvarovat nebo je aspoň minimalizovat tak, aby zde odlitek plně vyhověl požadavkům.

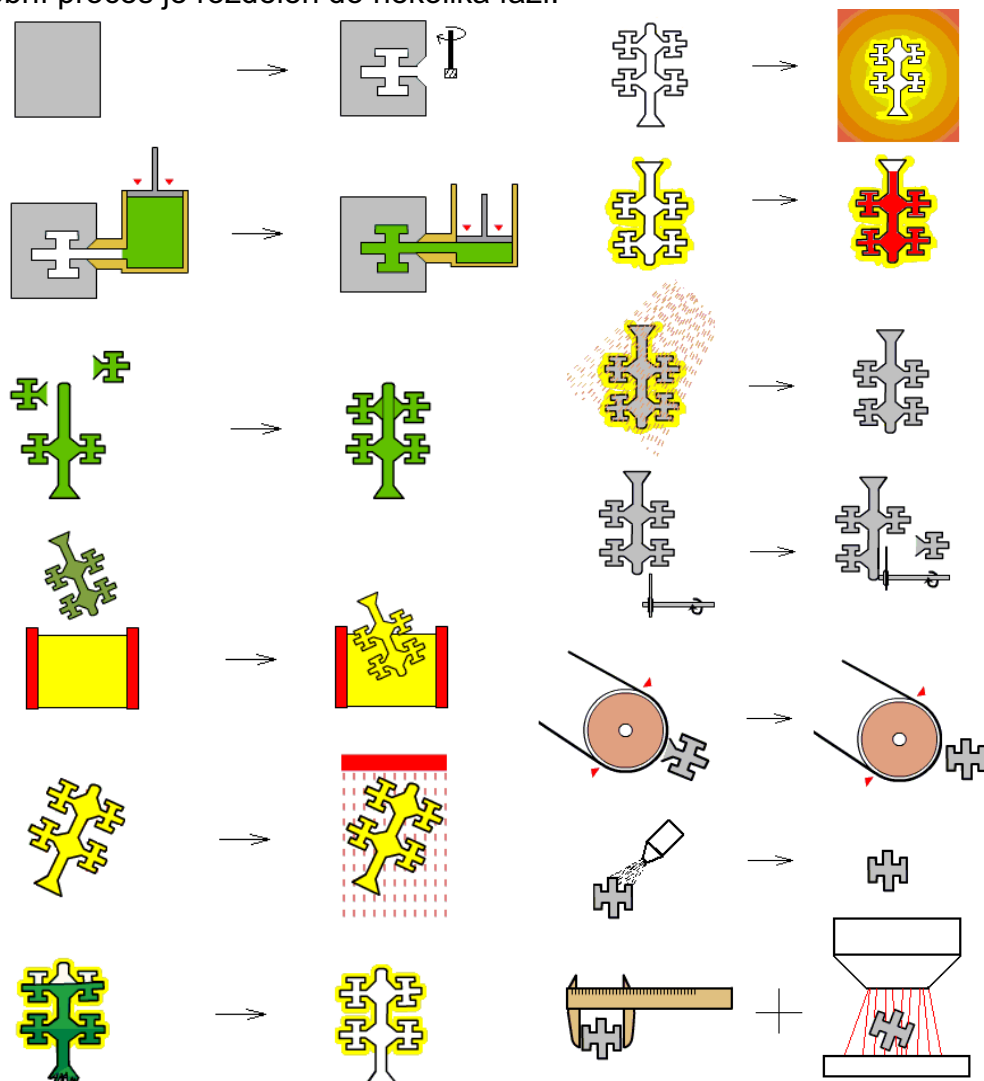
# 1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

## 1.1 Úvod do technologie

Tato technologie patří mezi nejstarší slévárenské technologie. Byla využívána Egypťany k odlévání šperků již před 5000-lety. Tento proces je také znám jako lití na ztracený vosk "lost wax" nebo též "investment casting". Tato technologie umožňuje odlévat výrobky složitých tvarů a to s dosaženou velmi vysokou přesností, bez použití následných dokončovacích operací. Dále se dají odlévat i kovy, které jsou velmi reaktivní jako je například: titan a jeho slitiny. Lze ji použít pro výrobu součástí, které nemohou být vyrobeny žádnou jinou technologií. Jedná se především o lopatky turbíny, které mají velice složitý tvar nebo části letadel, které musí odolávat vysokým teplotám [1].

## 1.2 Princip výroby a technologie

Výrobní proces je rozdělen do několika fází:



Obr.1.1 princip výroby lití na vytavitelný model [2]

### **1.2.1 Výroba modelu**

Hlavním předpokladem pro výrobu přesného odlitku je vyrobení přesného voskového modelu s požadovanými rozměry. Voskový model se vyrábí z voskové směsi a aby se docílilo požadovaných vlastností, jsou voskové směsi smíchány z více různých komponentů. Tímto se dosáhne přesně požadovaných vlastností pro konkrétní model pro výrobu daného odlitku. Vosková směs je vstřikovávána pod tlakem na vstřikolisech nebo méně často gravitačním litím do dutiny matečné formy. Dutina formy musí mít přesný tvar a rozměry jako konečný model. Po ztuhnutí se model vyjme z formy. Tímto postupem se dále vyrábějí i další součásti používané k výrobě modelu jako je náliček, vtoková soustava, vodící kanály [3],[4].

### **1.2.2 Sestavení modelu**

Modely se sestavují dvojím způsobem, buď jednotlivě nebo do stromečku. Sestavení jednotlivě se převážně používá u odlitků, které jsou rozměrnější a je na ně kladena velká přesnost nebo u odlitků, které by byly jinou technologií obtížně vyrobitelné. Vtoková soustava s náličky se k modelu připojuje lepením nebo pájením. Druhým způsobem sestavení modelů je sestavení do tzv. "licího stromečku". Modely se zde připevňují pomocí pájení na jeden společný vtokový kúl. Při sestavování modelů na kúl nesmí dojít k poškození ostatních modelů. Stromeček by měl být sestaven tak, aby byl k modelu umožněn dostatečný přístup a mohly být obaleny dostatečnou tloušťkou obalové hmoty. Modely jsou na stromečku umístěny dutinou dolů [4].

### **1.2.3 Výroba skořepinové formy**

Skořepinová forma musí být vytvořena kolem celého modelu. Základní podstatou výroby formy je postupné obalování voskového stromečku obalovou hmotou, tzn. břečkou a posypáním žáruvzdorným materiálem o určité zrnitosti. Obalové hmoty jsou založeny na dvou bázích. Na vodě nebo alkoholu. Proces obalování se opakuje dokud skořepina nemá dostatečnou tloušťku a počet vrstev bývá okolo 3 až 15. Toto závisí na požadované přesnosti, pevnosti a teplotní pevnosti dané skořepiny. Mezi jednotlivým nanášením obalové hmoty se skořepina musí nechat vyschnout a proto výroba skořepiny může trvat i několik dní. Toto záleží na počtu použitých vrstev. Hotová skořepina musí opět projít procesem sušení [5].

### **1.2.4 Vytavení modelu ze skořepiny**

Vysušená skořepinová forma musí být zbavena voskového modelu. Tento proces se provádí v zařízení zvaném autokláv nebo v modernějším bojlerkláv, kde dochází k vytavení modelu přehřátou párou o teplotě 135-165 °C a při tlaku 0.3 až 0.6 MPa. Skořepina je v peci umístěna tak, aby vosk mohl samovolně vytékat. Při této části procesu se na formě dají zjistit vady a praskliny. Vosk prasklinou vytéká a na povrchu skořepiny se projeví jako tmavá skvrna. Vosk, který se po vytavení shromažďuje, se po úpravě a regeneraci dá znovu použít [3].



### **1.2.5 Vytvrzení skořepiny**

Vytvrzení skořepiny se ve většině případů provádí v odporových pecích, kde se dosahuje teplot okolo 900 až 1100 °C a tím se docílí odstranění přebytečné vody, kterou skořepina obsahuje. Skořepina po vypálení dosahuje zhutnění struktury a tím má požadovanou pevnost a je schopna odolat vysokým teplotám. Další důvod vytvrzování skořepiny je ten, že se převede amorfni struktura na strukturu krystalickou [3].

### **1.2.6 Odlévání a dokončovací operace**

Odlévání je jednou z nejdůležitějších operací v celém tomto procesu. V dnešní době se odlévá velmi velká řada materiálů. Odlévá se do předehřáté skořepinové formy, nejčastěji těsně po vytažení z vytvrzovací pece. Tím se zabrání tepelnému šoku při vlévání žhavého kovu do formy. Po odlití a následném zchladnutí odlitku se skořepinová forma rozbije. Poté odlitek projde řadou dokončovacích operací. Mezi tyto operace patří:

- odstranění zbytků ze skořepinové formy
- odstranění odlitků z vtokové soustavy
- odstranění vtoků z odlitků
- tryskání odlitků
- kontrola a měření odlitků [3]

## **2 KERAMICKÉ SKOŘEPINOVÉ FORMY**

### **2.1 Základní poznatky skořepinové formy**

#### **2.1.1 Základní požadavky na formy keramické skořepiny**

Problémy spojené s výrobou a materiály keramických skořepin se zhoršili v důsledku uvedení Zákona o ochraně životního prostředí z roku 1992. Tento zákon limitoval množství emisí vzniklých při procesu. A tak bylo nevyhnutelné, aby obor přesného lití vylepšil současnou produkci a kvalitu lití. Dále se zredukovat výrobní náklady a hledat nové trendy pro tento proces. Optimalizace mechanických, chemických a fyzikálních vlastností keramické skořepiny byla základem k dosažení těchto cílů.

Nejdůležitější požadavky formy pro přesné lití:

- Dostatečná pevnost za syrova, která odolá odstranění vosku bez selhání.
- Dostatečná pevnost, která vydrží váhu litého kovu.
- Dostatečně křehká, aby zabránila trhlinám za tepla.
- Vysoká odolnost tepelnému rázu k zabránění vzniku prasklin při vlévání kovu.
- Vysoká chemická stálost
- Nízká reaktivita s kovy, které se odlévají za účelem lepší kvality povrchu.

- Dostatečná propustnost formy a měrná tepelná vodivost pro držení adekvátního převodu tepla skrze stěny formy a tím umožnění chladnutí kovu.
- Nízká tepelná roztažnost pro eliminování objemových a rozměrových změny stěn formy a nakonec i odlitku.

Tyto požadavky nejsou z daleka kompletní. Každý odlitek, který má být odlit, má své specifické požadavky na vlastní odlévání. To vede k řadě různých vlastností forem a materiálů, které jsou používány pro specifické účely ve slévárenském průmyslu [6].

### **2.1.2 Současná technologie skořepinové formy**

V dnešní době jen malé množství sléváren používá pojiva na bázi alkoholových. Většina větších sléváren přesouvá výrobu na vodě založených, koloidních křemenných pojiv. Tato pojiva obsahují nekrytalizované křemenné částice. Ztuhnutí koloidu pro vytvoření směsi se žáruvzdornými částicemi skořepiny lze dosáhnout odstraněním vlhkosti [6]. Keramické formy vyrobené z koloidních pojiv dosahují velmi nízké pevnosti za syrova a mají náchylnost k prasklinám při odstraňování vosku a manipulaci. Tento nedostatek se dá zlepšit přidáním přísad tekutých polymerů, které jsou buďto latexové pro alkalická pojiva nebo PVA pro kyselá pojiva. Polymery zvyšují keramickou pevnost za syrova a mají schopnost snížit hodnotu vlhkosti v usušených vrstvách při přidávání nových vrstev [7].

Použitím sodíku se podporuje krystalizace cristobalitu, což vede k produkování keramické vrstvy s dostatečnou pevností k tomu, aby odolávala přísnosti odlévání odlitku bez porušení nebo ztráty celistvosti. Nemodifikovaná koloidní pojiva jsou výjimečně silná, což vede k problémům u odlévání slitin, které jsou náchylné ke vzniku trhlinek za tepla. Použitím polymerem upravených pojiv se snižuje pevnost kvůli vypálení z organické fáze a tím dojde ke zvýšení propustnosti keramiky a snížení výskytu náliťků nebo nezaplnění při odlévání. [8]

## **2.2 Materiály používané pro výrobu keramické skořepiny**

### **2.2.1 Pojiva**

Pojiva, což je tzv. vazná kapalina, spolu se žáruvzdornými materiály tvoří obalovou hmotu při výrobě keramických skořepinových forem. Existují dvě základní možnosti použití pojiva, na vodě založené s oxidem křemičitým nebo na alkoholové bázi s oxidem křemičitým. Alkoholová báze se používá méně a to kvůli obtížím bezpečně zadržovat alkohol, který patří mezi těkavé látky. Použití alkoholové báze má však ale za následek snižování výrobních časů. V některých případech výroby skořepiny se používají oba typy současně. Pojivo na bázi vody se používá v prvních několika vrstvách a kolísavější alkoholové pojivo se používá pro střední (záložní) vrstvy. Alkoholová báze podporuje rychlé sušení

sekundárních vrstev a to zejména při vytvrzování amoniakem. Další vrstvy se dají nanášet již během několika minut.

Oba tyto typy patří do skupiny tzn. koloidů, výraz z řeckého slova pro lepidlo. Většina koloidů se dá zakoupit jako kompletní balení, které obvykle obsahuje i další komponenty jako jsou reaktivní mouky, smáčedla a antipěny. Koloid může být dostupný i samostatně což umožňuje uživateli, aby si vytvořil vlastní obalový materiál [9].

### **2.2.2 Druhy pojiv na trhu**

#### Customcote pojiva

Je to koloidní pojivo založené na bázi oxidu křemičitého a ethyl silikátu. Může být použito jak pro primární, tak záložní vrstvy skořepiny. Tato pojiva mohou být použita s různými žáruvzdornými materiály v závislosti na použitém technologickém postupu a požadavku na odlévání. Customcote pojiva mají vynikající vlastnost vázat vlhkost a proto eliminují potřebu před-vlhčení. Pojivo se dá použít na břechy o menší viskozitě, což umožňuje lepší pokrytí skořepiny i v méně přístupných místech a zkracuje dobu určenou pro vysušení.

Tímto pojivem vyrobená skořepina je tenká, ale přesto dostatečně pevná. Výhodou je zde snižování ochranných vrstev, které se používají v současné době a tím se zároveň snižuje i váha skořepiny [10].

#### Deluxcote koncentrát

Koncentrát je záložní koloidní pojivo oxidu křemičitého, jedinečně formulované k tomu, aby vytvořil silnější, pevnější a více pružnější jednotlivé ochranné vrstvy skořápky. Pomocí této nové revoluční technologie je požadováno méně ochranných vrstev k tomu, aby se vytvořil plášť skořápky, který bude odolávat námahám při manipulaci, odvoskování a vlastnímu odlévání. Má vynikající vlastnosti smáčení a odvodnění.

Deluxcote koncentrát tvoří skořápku která je silnější, má lepší viskozitu a snáší větší lomové zatížení a mez pevnosti, než pojiva, které byly používány dosud. Při srovnávání se stávajícími záložními pojivy skořápky o 3 ochranných vrstvách vydrží stejné silové zatížení jako skořápky o 5 ochranných vrstvách stávajících pojiv. Proto se s tímto pojivem výrazně zkracují i výrobní časy potřebné pro vyrobení skořepiny.

Tento koncentrát byl vyvinut speciálně právě pro snížení vrstev a zvýšení pevnosti a pružnosti. [10]

#### EHT pojiva

EHT pojiva jsou založena na vodní bázi s koloidním oxidem křemičitým a modifikovaná volným polymerem. Jednou z jeho primárních vlastností je přesně určená velikost a rozložení velikosti částic. Toto pojivo bylo vyvinuto pro zvláštní požadavky na vysokou teplotu při odlévání. Při procesech odlévání na usměrněné tuhnutí „directional solidification (DS)“ a jednotného krystalu „single crystal (SC)“ se vystavují skořápky velmi vysoké teploty okolo

1500 °C po dlouhou dobu, která je okolo 2 hodin po d zatížením roztaveného kovu. Přesné procesy vyžadují skořepiny, které mají odpovídající vysokou tepelnou pevnost a odolnost proti tečení na úrovni, které jsou mnohem přísnější než ty, které jsou obvykle vyžadovány v komerčních slévárnách. EHT pojivo poskytuje:

- vysokou tepelnou a žáruvzdornou pevnost 1000°C a vyšší
- pojivovou a břeczkovou stabilitu – dokonce i se žáruvzdorným zirkonem
- vynikající nátěrové a adhezní charakteristiky
- obsahuje volné polymery

Tyto vlastnosti umožňují úspěšné vytvoření skořepiny s konkrétními geometrickými složitostmi. EHT pojivo je ideální pro skořepiny kde je potřeba vysokých teplot. [10]

#### Fascote pojivo

Fascote pojiva se žáruvzdornými přísadami jsou všeobecně považovány za první komerčně uznávané na vodě založené záložní pojiva. Fascote pojiva jsou formulována speciálně pro použití s Fascote žáruvzdorným materiálem a společně nabízejí slévání řádu výhod. Tento systém může snížit výrobní časy z doby 4-6 dnů pro standardní koloidní křemenný materiál na dobu jen jednoho dne. Váha této skořápky se dá snížit oproti standardní skořepce, což vede k vytvoření větší skořepiny. Pevnostní síla skořepiny se dá zvýšit aplikací další ochranné vrstvy.

Tento systém byl úspěšně použit při odlévání sousoší, kosmických částí, turbínových lopatek a výrobních zařízení. Jsou to jen některé odlitky vyráběné za pomoci tohoto pojiva. Toto pojivo je stejně účinné jak na větší, složitější odlitky tak i na odlitky menších rozměrů. [10]

#### Keycote pojiva a koncentrát

Keycote je systém, který se skládá ze dvou částí primárních složek. Keycote pojivo a koncentrát jsou smíchány dohromady v poměru 4:1 při výrobě keramické břčky. Tento systém je stabilní v širokém rozmezí pH, vytvořená břčka má prakticky neutrální pH - přibližně 7,5. U pojiva se dá dosáhnout i kyselých břček, kdy jako přídatný materiál se použije zirkon nebo kobalt. Systém břčky je přitom navržen tak, že i při změně pH na nižší není ohrožena stabilita dané břčky. Údržba břčky se provádí pouze pravidelným přidáváním vody do systému kvůli odpařování.

Vzhledem k tomu, že první vrstvy ochranného obalu jsou velmi důležitou součástí pro přesné odlévání, adhezní vlastnosti systému jsou lepší než ostatní břčky pro dlouhou životnost.

Základní vlastnosti systému:

- Mimořádná životnost břčky, snížení spotřeby surovin a finančních nákladů spojených s odstraněním skořepiny a obnovu systému.
- Úspora času a nákladů vyplívajících ze zkoušení břčky a její úpravy a údržby

- Vynikající přilnavost k voskovému modelu, což snižuje povrchové vady a náklady za zmetkové výrobky.
- Vynikající schopnost smáčení. [10]

### Primcote pojiva

Primcote pojivo je v přesném odlévání na vedoucí pozici, je založené na vodě s koloidním oxidem křemičitým. Tento typ pojiva je formulován na odstranění vzpěru, vnitřního pnutí a na praskání primární vrstvy skořepiny. Primcote pojiva umožňují rychlejší sušení primárních obalových vrstev s nižší vlhkostí a zvýšenou cirkulací vzduchu. Toto pojivo nemůže být sušeno jako standardní koloidní křemičité pojivo, proto obsahuje i další přísady jako smáčedlo, odpěňovací prostředek, barevný indikátor, který zde sleduje vlastní sušení formy. Dále je pojivo kompatibilní s běžnými žáruvzdornými materiály a dají se s ním odlévat jednoduché i složité výrobky. [10]

### BINDZIL koloidní oxid křemičitý

BINDZIL koloidní oxid křemičitý je směsí mikročástic rozptýleného křemene ve vodním roztoku. Tento typ pojiva je jeden z nezákladnějších a slouží jako lepidlo, které drží spolu pohromadě keramickou skořepinu. Je to standardní komponent břečky a lze ho použít jak pro primární, tak pro záložní vrstvy. Toto pojivo je velice populární po celém světě díky své konzistenci a kvalitě. Pro dosažení přesného lití mohou být do pojiva přidány různé komponenty, které zlepšují požadované vlastnosti na břečku. Mezi ně patří smáčedlo, odpěňovací prostředek nebo indikátor sušení.

Tento prostředek patří mezi nejpoužívanější pojiva ve slévárnách [10]

### **2.2.3 Plniva**

Jako plniva se používají žáruvzdorné materiály, které výrazně určují vlastnosti při výrobě skořepiny. Na trhu je velmi velká řada žáruvzdorných materiálů, které obsahují základní prvky jako jsou tavený oxid hlinitý, tavný křemen, zirkon, hlinitokřemičitany a oxid zirkoničitý. Pro výběr vhodného žáruvzdorného materiálu je základní pochopení specifické potřeby zákazníka a dále podle toho jaké zákazníkem upřednostňuje kritéria: tepelná roztažnost, tepelná vodivost, permeabilita, reaktivita sliti, snadnost odstranění, pevnost skořápky, velikost částic, atd. Materiál používaný jako plniva se používá i jako posypový materiál k obalování skořepiny, ale používaný materiál k vytvoření skořepiny může, ale nemusí být stejný pro břečku a posypový materiál. [10],[11]

### **2.2.4 Druhy plniv na trhu**

#### Ranco-Sil tavný křemen

Ranco-Sil je elektricky tavný křemen vysoké čistoty. Tavný křemen má nízkou tepelnou vodivost a vynikající odolnost proti tepelnému šoku. Tyto

vlastnosti spolu s nízkou hustotou mají za následek velmi výborné žáruvzdorné schopnosti pro použití na výrobu skořepinové formy. Ranco-Sil tavný křemen je k dostání ve formě moučky nebo v granulované podobě. Tavný křemen může být použit na výrobu celé skořepiny. Při použití na primární vrstvy může být nezbytné, aby směs obsahovala i zirkon v závislosti na odlévané slitině. Skořepina vyrobená z tavného křemene lépe drží své rozměry a není náchylná k deformaci nebo k vyboulení stěny formy. Rozbití nebo odstranění skořepiny je při použití tavného křemene také jednodušší. [10]

Další vlastnosti plniva:

- Nízká hmotnost
- Vysoká prodyšnost
- Dobrý izolátor
- Velmi čistý materiál pro dlouhou životnost břečky
- Praktické pro odlévání železných i neželezných slitin
- Nízká tepelná roztažnost [11]

### Mulcoa

Tento typ plniva je na bázi hlinito-vápenatého křemičitanu, který je vyroben z páleného mulitu a je ve velikostech moučky nebo zrna, které se vyrábí ve velkém rozsahu. Dále je k použití při třech možnostech obsahu oxidu hlinitého a to o 47%, 60% a 70%. Pro standardní odlévání se nejvíce používá verze o 47%, která zajišťuje dobrou konzistenci produktu i ekonomické využití. Tento produkt má nízký obsah železa a alkalických prvků. Hlavní využití při odlévání je na záložní břečky a záložní obalové materiály. [10]

Další vlastnosti plniva:

- Má přísnou kontrolu na rozložení částic na minimalizaci prachu a maximalizaci pevnosti
- Vynikající žáruvzdornost
- Dobrá pevnost
- Široká škála velikostí
- Poměrně nízká tepelná roztažnost
- Ekonomicky výhodná [11]

### Zirkon plniva

Je to přirozeně se vyskytující žáruvzdorný minerál. Je chemicky inertní a stabilní do velmi vysokých teplot. Zirkon má velmi vysokou tepelnou vodivost a velmi nízkou reaktivitu s roztaveným kovem, což vede k vyrobení velmi kvalitního hladkého povrchu. Je k dispozici ve formě moučky nebo v granulované podobě. Zirkon je používán téměř výhradně na primární břečky a jako primární obalový materiál a to díky tomu, že jeho hustota umožňuje tyto vynikající vlastnosti. [10]

Další vlastnosti plniva:

- Vysoká pevnost
- Vynikající reologie ( studie o deformaci hmoty)
- Velmi jemné částice pro kvalitu povrchu
- Velmi nízká reaktivita [11]

### **2.2.5 Přísady používané k výrobě skořepiny**

#### Anti-pěny:

Jsou to chemické látky určené k prevenci vzniku nebo k odstranění pěny vzniklé při přípravě keramické břečky. Další vlastností antipěny je, že pomáhá odstranit vzduch z břečky. Anti-pěn je na trhu velké množství.

#### REMET Foamaway

Je to anti-pěna založená na silikonu, poskytuje okamžité odstranění pěny z břečky. Zajišťuje dlouhodobou prevenci proti vzniku pěny a dobrou stabilitu. Je velmi užitečná pro alkalické křemičitanové koloidní břečky.

#### RDS-100

Poskytuje vynikající výkon v různých podmínkách a velmi rychle odstraňuje pěnu a uvolňuje vzduchové bubliny z břečky. Je kompatibilní s mnoha druhy smáčidel a s alkalickými nebo i kyselými pojivovými směsi. [11]

#### Smáčedla:

Jsou to chemické látky, které se do břečky přidávají za účelem snížení povrchového napětí dané směsi, tím umožňují snadnější šíření a nanášení keramické břečky na model. Smáčedla jsou rozpustná za pomoci rozpouštědel nebo přímo ve vodě.

#### REMET Wet-In

Poskytuje dobré smáčení voskových modelů, rychlé vmíchání do břečky a nesnižuje její životnost. Má dobré rozptylové a emulgační vlastnosti a je stabilní v kyselých a základních směsích.

#### Aerosol OT-75

Obsahuje anionaktivní činidlo, které poskytuje vynikající smáčecí vlastnosti i při malém množství smáčedla. [11]

## **2.3 Zařízení používané při výrobě skořepinové formy**

### **2.3.1 Míchací zařízení pro výrobu břečky**

#### Deluxe Slurry Mixer

Je to zařízení pro výrobu břečky. Je vybaveno nerezovou nádrží, aby při výrobě nedocházelo ke kontaminaci životního zařízení. Tento mixér je vybaven převodovkou a motorem. Celé zařízení je chráněno před postříkáním břečky ochrannými kryty a tím má zařízení prakticky tichý chod. Nádrže jsou zde k dispozici v rozsahu objemů 20, 45, 90, 160, 250, 375, 725 galonů.

Další volitelné funkce zařízení:

- Proměnlivá rychlost mechanizace
- Kapalinou chlazená lopatka

- Kryty nádrže
- Plynulý start, 3-fázové napětí
- Vlastní velikost nádrží [10],[12]



Obr.2.1 Míchací zařízení Felixe spurty mixer [13]

### Economy Slurry Mixer

Tento mixér má polyethylenovou nádrž, nerezové čepele a dvouřemenový převod pro přenos rychlosti. Mixér je jednoduchý, bezpečný, odolný. Motor je zde chráněn před postřikám břečkou krytem, ale není zde zcela uzavřen. Mixér je k dispozici v rozsahu objemů 30, 75, 130 galonů. [10],[12]



Obr.2.2 Míchací zařízení Economy spurty mixer [13]

## **2.3.2 Posypové zařízení na obalování skořepiny**

### Sprchové posypové zařízení

Zařízení slouží k posypání skořepinové formy obalovým materiálem. Obalový materiál se v zařízení otáčí pomocí bubnu a v horní části zařízení posypovou stěnou padá dolů. Posypová stěna se dá odstranit pro snadnější čištění nebo vyměnit za jinou velikost síta třídiče, což umožňuje použít různé druhy velikostí zrna posypového materiálu. Posypová stěna zabezpečuje dokonalé obalení celé skořepinové formy. V zadní části zařízení je umístěno odsávání, které vtahuje prach z přední části přes horní část do potrubí o vysoké rychlosti sání. [10],[12]

### Fluidní posypové zařízení

Fluidní posyp je velmi jednoduchý, ale přesto důkladný způsob k vytvoření skořepiny namočené do břečky. V nádobě je umístěn posypový materiál, který je za pomoci vysokého stlačeného vzduchu vháněn do spodní části nádoby, kde se skrze pórovitou desku rozptyluje do posypového materiálu tak, že dojde k jeho vznášení. Skořepina se pak snadno ponoří do posypového materiálu pro obalení vrstvy [10],[12]





Obr.2.3 Sprchové posypové a fluidní zařízení [13]

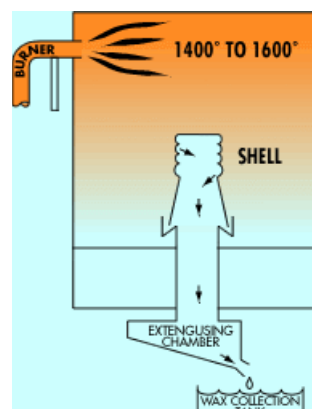
### 2.3.3 Zařízení pro vytavení vosku z hotové skořepinové formy

#### FlashFire Dewax System

Zařízení je přizpůsobeno k odstraňování vosku ze skořepiny a její vytvrzení. Systém využívá vysoké teploty okolo  $760^{\circ}\text{C}$  až  $870^{\circ}\text{C}$  a poměrně malou ohřivací dobu, aby nedocházelo zbytečně k ovlivňování skořepinové formy. Výsledkem je, že prasknutí formy je zde prakticky vyloučeno, není zde potřeba odvětrávání a tím snižování tlaku ve skořápce. Během 10 minut zde dojde k úplnému odvoskování a do 20 minut dojde k vypálení skořepiny. Vosk zde potrubím odtéká, je zbaven vlhkosti a připraven k rekultivaci.

Výhodou tohoto zařízení:

- Spojuje se zde vytavení vosku s vytvrzením skořepiny, tím odpadá potřeba samotného zařízení boilerkláv a pece na vytvrzení.
- Vosk zde nemusí být posílán na rekultivaci a je potřeba jen malá údržba
- Zařízení snižuje požadavky na životní prostředí [10],[12]



Obr. 2.4 Vytavovací zařízení FlashFire Dewax Systém [13]

### Boilerclave

Je to speciální zařízení na odstranění vosku ze skořepiny. Princip vytavování je založen na elektrickém vytápění, kde se k odstranění vosku používá přehřáté páry o teplotě 160-170°C a pracovního tlaku 0.6-0.8MPa. Nástup na pracovní hodnoty je v rozmezí 8-14 vteřin.

Hlavní výhody zařízení:

- Ideální vlastnosti páry pro přenos tepla
- Snadnost sběru vytaveného vosku
- Vysoká účinnost zařízení



Obr. 2.5 Vytavovací zařízení Boilerclave [13]

### **2.3.4 Zařízení pro vytvrzování skořepinové formy**

#### PKI Burnout Ovens

Tato pec je díky dobré izolaci určena na teplotu 1150°C při nepřetržitém provozu a na teplotu 1200°C při přerušovaném provozu. Vyšší teploty jsou k dispozici a závisí na požadavcích zákazníka. Tato pec je vybavena dvěma hořáky střední rychlosti, které jsou určeny pro vysoký výkon, s přebytkem vzduchu. Tyto plně regulované hořákové systémy poskytují lepší kontrolu nad přebytkem vzduchu v peci až na 10% kyslíku, což umožňuje komplexní, čisté vytvrzení složek skořepiny. [10],[12]



Obr.2.6 princip výroby lití na vytavitelný model [13]

### **2.3.5 Robotizované linky pro výrobu skořepinové formy**

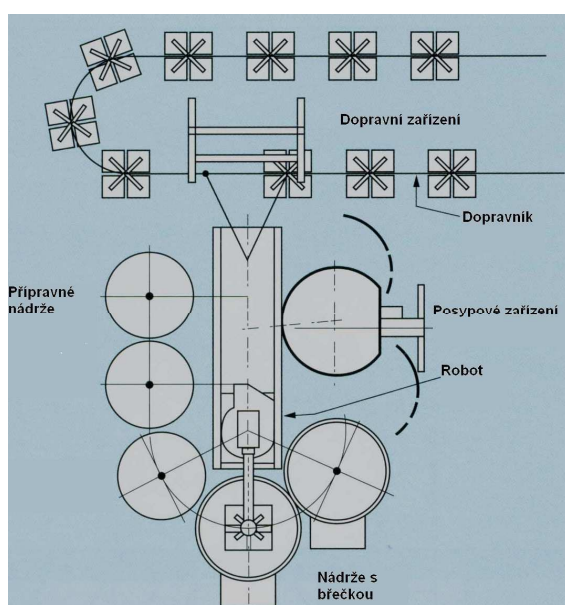
#### Robotizovaná linka robotem IRB 7600

Přesné odlévání je stále více náročné na lidskou práci. Výroba odlitků bývá ve větších případech ve velkých sériích a je zde požadována velká

flexibilita a preciznost odborných dělníků k tomu, aby se dosáhla požadovaná přesnost zákazníka. Proto se začaly používat tzn. robotizované linky, kde hlavní roli tvoří automatizovaný robot např: IBR 7600.

Princip linky:

Voskové modely sestavené do stromečku jsou přiváděny na dopravníku do pracovního prostoru robota, který zde pomocí nastaveného programu vykonává vlastní obalování stromečku tj. namáčení do břechky, posypání obalovým materiálem a umístění do sušárny. Robot disponuje dostatečně velkým dosahem 3.5m a vysokým užitečným zatížením 150kg a tím může obalovat větší, těžší skořepiny a redukovat výrobní časy. [14]



Obr.2.7 Robotizovaná linka [15]



Obr.2.8 Robot IBR 7600 [14]

## 2.4 Defekty a problémy keramické skořepiny

### 2.4.1 Problémy přípravy modelu

Proces čištění a leptání modelů se v posledních letech změnil. V minulosti voskový model nebyl považovaný za připravený k obalování pokud pozorovaný leptaný povrch byl vidět. Příklad naleptaného povrchu je zobrazen na obr. (2.9),(2.10). V dnešních slévárnách jsou někdy modely připravovány bez čistícího procesu a jsou jen opláchnuté vodou. Toto je možné pomocí ve vodě rozpustných činitelů leptající vosk. Jiné techniky zahrnují použití mírnějších čistících prostředků se saponátem, které zajišťují lepší očištění modelů.

Účelem čištění voskového modelů je odstranění nečistot a voskových šupinek, které mohou způsobit defekty v následném obalovacím procesu.



Obr.2.9 Příliš vyleptaná plocha [16]



Obr.2.10 Správně vyleptaná plocha [16]

Pokud je požadováno leptání tj. zdrsňování povrchu modelu, tak správná metoda je ponoření modelu do rozpouštědla jen na tak dlouho, aby se pouze odstranily nežádoucí nečistoty a vytvořilo se jen slabé vyleptání. Toto nepatrné vyleptání vytvoří na povrchu modelu mikroskopickou drsnost, která zlepší přilnavost keramické břečky na povrch modelu a tím poskytne odlitek s vynikající povrchovou drsností. Toto leptání pomůže zabránit vyboulení primárního obalu, zvláště na velkých plochách. Nejlepší pokrytí voskového modelu dosáhneme kombinací odstranění nečistot a silikonů. Udržování správné koncentrace snášivosti břečky zajišťuje nejlepší keramické skořepiny a nejhladší povrch při odlévání.

Pravděpodobné příčiny příliš-vyleptané plochy:

1. Příliš dlouhá doba v čistícím prostředku.
2. Špatná kontrola rozpouštěcí směsi.
3. Pozdní oplachování.

Návrhové řešení problému:

1. Použití přesně stanovené doby pro čištění.
2. Dodržování správné kontroly nad procedurou.
3. Opláchnutí leptané plochy ihned po vyjmutí z prostředku.

Pravděpodobné příčiny málo-vyleptané plochy:

1. Nesprávné čištění nebo leptání plochy
2. Nedostatečné množství smáčedla v primární břečce
3. Nedostatečně čistý model po mytí nebo leptání

Návrhové řešení problému:

1. Zkontrolování účinnosti čistícího roztoku.
2. Dodržovat doporučené množství smáčedla dané výrobcem.
3. Provedení znovu vyčištění a opláchnutí. [16]

#### **2.4.2 Problémy přípravy keramické břečky**

Keramická břečka by neměla být připravována pouze v ponorné nádrži, ale měla by být připravena v samostatných nádržích s míchacím zařízením. Čerstvě smíchaná keramická břečka obsahuje velké množství chyceného vzduchu. Vzduch se do břečky dostává spolu s přidávaným přidavným materiálem. Jak se plnivo vmíchává do břečky je vzduch vytlačován k hladině

a odchází do ovzduší. Tím, že odstraníme vzduch, dosáhneme maximální pevnosti a stabilní viskozity. Vhodné je, aby se břecha míchala přes noc, než se použije k vytvoření skořepiny. Rotující nádrže jsou účinné pro míchání pevných moučkových směsí, méně účinné pro tekutější směsi.

Následující doporučená výroba:

- Pečlivé naměření přesného množství pojiva a plniva.
- Přidání pojiva do míchacího zařízení a postupně se přidává plnivo. Pokud se používá více žáruvzdorných mouček přidává se napřed moučka s obtížnější mísitelností.
- Viskozita břechky bude z počátku vysoká kvůli obsahu vzduchu, který se promícháváním postupně odstraní.
- Promíchávání se děje pomalu bez vzniku vírů, aby se břecha řádně stabilizovala, což může trvat i 24-48 hodin.
- Pro primární břechky se přidává smáčedlo pro lepší přilnavost na voskový model.
- Dále se do břechky přidává anti-pěna a spolu se smáčedlem se smíchají s vodou pro lepší mísitelnost s břechkou, voda se do břechky přidává kvůli částečnému vypařování. [16]

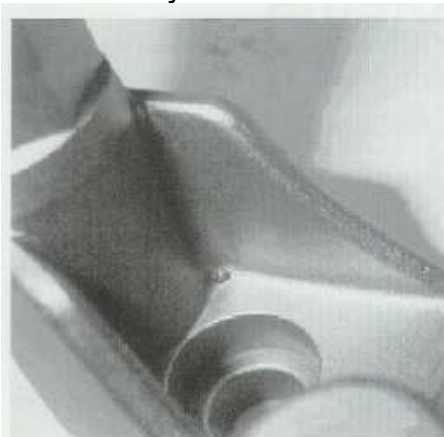
#### Vytvoření bublinek na skořepině

Pravděpodobná příčina:

1. Nedostatečné množství smáčedla v břechce, které vede k neomočení rohových míst skořepiny.
2. Viskozita keramické břechky je hodně vysoká.
3. Nesprávný postup ponořování nebo špatné mechanické odstranění vzduchu z břechky.

Návrhové řešení problému:

1. Dodržení doporučeného množství smáčedla daného výrobcem.
2. Snížení viskozity břechky nebo použití rozpouštědla.
3. Sledování tvorby vzduchových bublinek v břechce a jejich případné vyloučení. Použití pomalého ponořování a dodržení správné orientace při odkapávání, aby se zabránilo zachycení vzduchové bublinky v obalu nebo použití vakuové metody.



Obr.2.11 Vzduchová bublinka v koutě součásti [16]

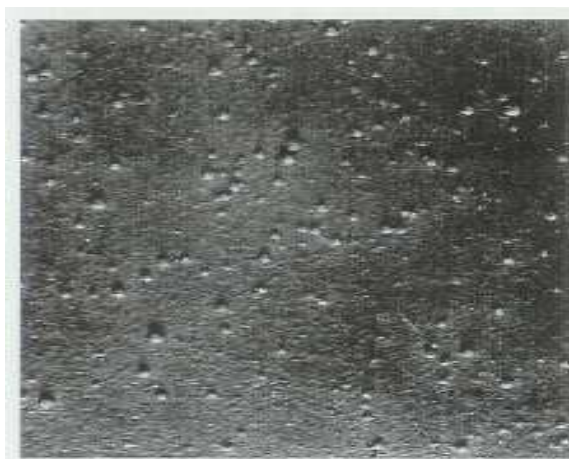
### **2.4.3 Problémy posypového materiálu a dalších příčin hrubého povrchu**

Pravděpodobná příčina:

1. Nanášená vrstva břechky je příliš tenká.
2. Namáčení do břechky je prováděno příliš dlouho před vložením do sprchového posypového zařízení.
3. Posypový materiál je příliš hrubý.
4. V posypovém zařízení padá materiál při vytvoření vrstvy z vysoké výšky.
5. Nesprávné proudění vzduchu ve fluidním zařízení.
6. Vytvoření pěny v břechce nebo její nestabilita.
7. Ovlivnění skořepiny odlévaným kovem.

Návrhové řešení problému:

1. Použití břechky o vyšší viskozitě.
2. Optimalizace časů mezi procesy obalování skořepiny.
3. Použití jemnějších posypových materiálů.
4. Držení modelu při obalování v požadované výšce ve sprchovém posypovém zařízení.
5. Snížení nebo zvýšení průtoku vzduchu dle potřeby, aby bylo možné dosáhnout vytvoření požadovaného obalu skořepiny
6. Přidáním anti-pěny (jen nutné minimum) nebo smáčedla a upravím míchacích podmínek a zajištění odstranění vzduchu z břechky.
7. Lepší kontrola teploty roztaveného kovu nebo zajistit větší žáruvzdornou schopnost skořepiny.[16]



Obr.2.11 Hrubý povrch součásti [16]

### **2.4.4 Problémy vysoušení skořepiny**

Chladící efekt tzv. "mokrého" a "suchého teploměru:

Skutečnost, že působením tepla se voda vypařuje, je dobře známo. Nižší relativní vlhkost vzduchu má za následek silnější chladící účinek. Nejstarší metoda měření vlhkosti je pomocí chladícího účinku tzv. "mokrého" a "suchého teploměru. Proud vzduchu, proudící kolem mokrého teploměru, snižuje hodnotu teploty. Suchý teploměr udává teplotu vzduchu. Z rozdílu suchého a

mokrého teploměru se určuje hodnota relativní vlhkosti. Čím větší rozdíl na teploměrech tím nižší vlhkost.

Vosky se rozpínají a smršťují mnohem rychleji než materiál skořápky. Tento rozdíl vede k tomu, že odvoskování v autoklávu musí proběhnout rychle, aby tepelná roztažnost vosku nezpůsobila deformaci či prasknutí skořepiny. Tento samý problém se tvoří i při rozpínání vosku při sušení formy. Při vysušování skořepiny na voskovém modelu dochází k odpařování vlhkosti. Tím že odchází vlhkost snižuje se teplota skořepiny a vosku, který tímto nepatrně zmenší svoji velikost. Skořepina neexpanduje tak rychle jako vosk, čímž může dojít k její porušení. Účinky těchto pochodů se musí brát v úvahu při vlastní výrobě skořepiny. [16]

### Správné podmínky sušení

#### Relativní vlhkost:

Vzhledem k chladicímu účinku mokrého teploměru by měla být při sušení primárních vrstev skořepiny relativní vlhkost vzduchu nad 50%. Čím tenčí části tím větší je kritická hodnota vlhkosti. Tenké části mají snahu se rozpínat snadněji než tlustší části. Poté, co jsou na primární vrstvy nabaleny záložní vrstvy, stoupá izolační schopnost skořepiny a to umožňuje snížit relativní vlhkost a urychlit proces sušení. Volba vlhkosti při sušení se volí jako kompromis mezi rychlostí sušení a deformací skořepiny. Použitím polymerů v primárních vrstvách přidává na pružnosti těmto vrstvám, takže může být snížena relativní vlhkost při sušení. Někdy lze vlhkost snížit až na 35%, ale není to obecně doporučeno.

#### Teplota:

Dokonce i bez chladicího účinku sušení je správné udržovat správnou kontrolu nad okolní teplotou formy v průběhu její výroby. Změny teploty při sušení by mohli způsobit, že vosk se bude ve skořepině roztahovat a tím způsobí deformaci skořepiny. Z tohoto důvodu je nutné teplotu kontrolovat 24 hodin denně. U jakékoliv relativní vlhkosti je rychlost sušení větší s rostoucí teplotou.

#### Proudění vzduchu:

Proudění vzduchu je nutné dodržovat nepřetržitě po celou dobu procesu sušení. Ve skutečnosti je požadováno minimum změn pro vzduchotechnická zařízení zajišťující vlastní sušení. Při sušení primárních vrstev je nejlepší, když nedojde k přímé srážce proudu vzduchu na skořepinu nebo je omezena na minimum. Rychlosti proudění na primární vrstvy jsou okolo 0,5-1m/s. Při sušení záložních vrstev se proudění může výrazně zvýšit na hodnoty 2,5-5m/s. Dále by se mělo zajistit, aby proudění vzduchu na formy šlo ze všech stran rovnoměrně.

#### Pravděpodobná příčina vzniku defektů:

1. Příliš nízká vlhkost během sušení.
2. Sušení probíhá příliš dlouhou dobu.
3. Nerovnoměrné proudění vzduchu na skořepinu.
4. Špatná příprava keramické břečky nebo její údržba.

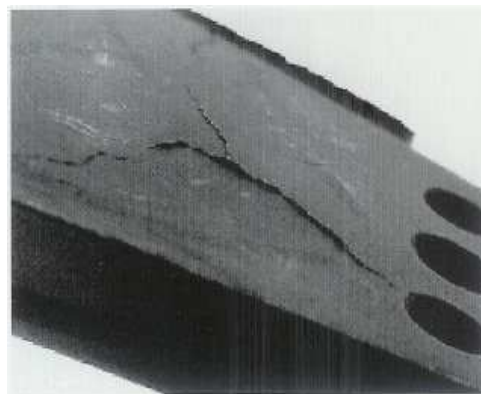
### 5. Teplotní nestálost při sušení. [16]

Návrhové řešení problému:

1. Zvedneme vlhkost během primárního sušení.
2. Zajistíme minimální dobu sušení potřebnou k tomu, aby se zamezilo odloučení skořápky od vosku.
3. Na vodě založené primární břečky použité na skořepině by měli být sušeny v klidném vzduchu. Minimalizujeme přímé působení vzduchu přímo na skořepinu.
4. Tento problém je v oblasti problémů přípravy břečky.
5. Lepší výběr žáruvzdornosti (Hlavním faktorem během vypalování)



Obr.2.12 Popraskání skořepiny při sušení [16]



Obr.2.13 Vytvoření hřbetu kvůli prasklince skořepiny [16]

## 2.4.5 Problémy při vytavování vosku ze skořepiny

### Vytavování vosku v autoclávu

Úspěšné odvoskování závisí na co nejrychlejší odstranění vosku ze skořepiny. Vosk má větší tepelnou roztažnost než skořepina a kdyby vytavování probíhalo velmi pomalu nebo při nízké teplotě, došlo by vlivem této rozdílné roztažnosti k prasknutí skořepiny. Jakmile jsou skořepiny v autoclávu, musí být připuštěna pára v nejkratším čase. Pro odvoskování se používá tlak páry 0,7MPa na dobu 10 sekund. Tyto hodnoty jsou dobré pro minimalizování prasknutí skořepiny. Na konci procesu vytavování vosku je stejně důležité, aby se tlak zase snižoval pomalu. Příliš rychlé snížení tlaku může způsobit vznik vody ve skořepině a to pak vede k oddělení jednotlivých vrstev nebo k prasknutí formy. Postupné snižování tlaku by mělo trvat okolo 2 minut.

Pozornost těmto informacím s použitím dobře vyváženým autoclavem by mělo minimalizovat nebo úplně odstranit problémy s porušením pláště skořepiny.

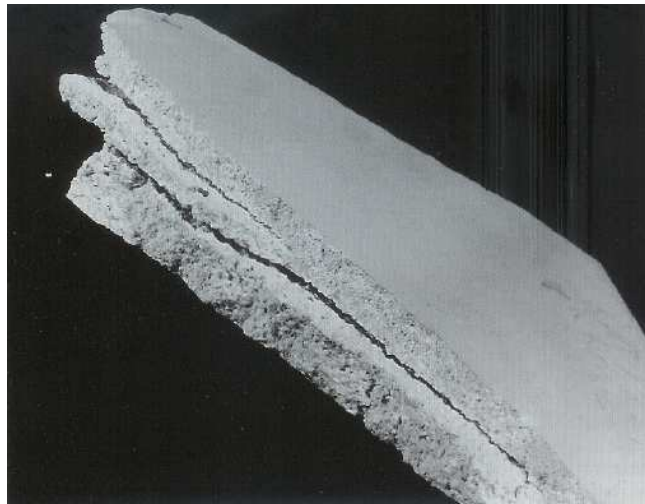
Pravděpodobná příčina oddělení vrstev skořepiny:

1. Velmi rychlé snížení tlaku v autoclávu.

Návrhové řešení problému:

1. Regulované řízení snižování tlaku. [16]

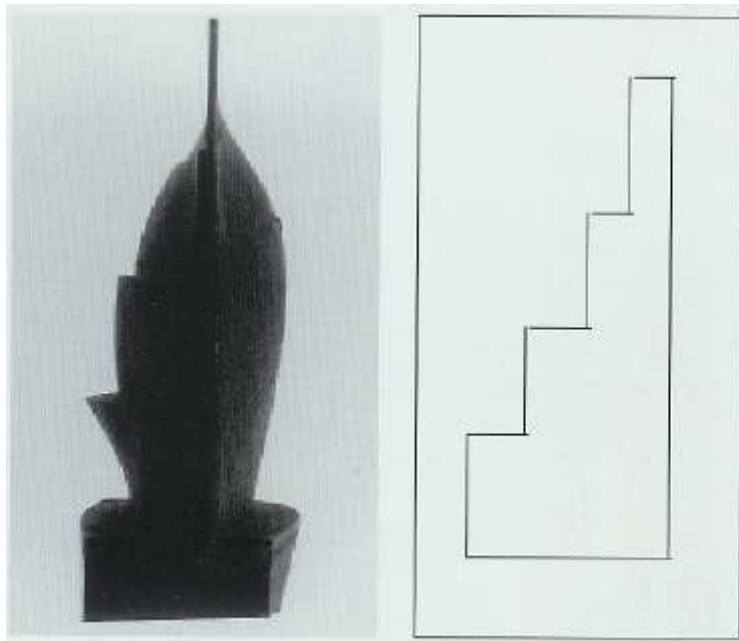




Obr. 2.14 Oddělení jednotlivých vrstev skořepiny [16]

#### Změna tvaru při přehřívání:

Na obrázku (Obr. 2.15) je zobrazen vzorek, kde je úmyslně naznačena změna rozměrů při přehřívání. Při tomto procesu se na vzorku projevují plasticko-elastické deformace. Náčrtek na obrázku ukazuje skutečný tvar voskového modelu.



Obr. 2.15 Změny způsobené přehříváním [16]

Pravděpodobná příčina :

1. Vysoká vypalovací teplota.
2. Nedostatečný žáruvzdorný charakter skořepiny.
3. Teplota nebo tlak kovu odlévaného do skořepiny jsou příliš vysoké.
4. Odvádění tepla je nedostatečné. [16]

Návrhové řešení problému:

1. Snížení teploty.
2. Lepší volba žáruvzdorného materiálu při výrobě skořepiny.
3. Lepší kontrola teploty a snížení tlaku.
4. Použití žáruvzdorného materiálu, který teplo rozptyluje a nepůsobí jako izolátor. [16]

## ZÁVĚR

Účelem bakalářské práce bylo shromáždit informace o technologii přesného lití pomocí vytavitelného modelu. V první části je zde popsán proces technologie od začátku výroby voskového modelu až po vlastní odlévání. Celý proces technologie je zde naznačen pouze okrajově.

Hlavní část se zaměřuje pouze na problematiku spojenou s výrobou keramické skořepinové formy. Jelikož jsou kladeny stále větší požadavky na přesnost a kvalitu odlitku musí být i skořepinová forma vyráběna s velkou přesností. Vlastnosti skořepinové formy se odvíjí od materiálů a výrobních zařízení používaných při její výrobě. V práci je uvedeno základní rozdělení nejpoužívanějších materiálů pojiv, plniv a přídavných prvků, které spolu tvoří základní stavební hmotu skořepinové formy. U uvedených typů materiálů jsou popsány jejich základní vlastnosti, výhody a nevýhody. Dále je uveden přehled výrobních zařízení a strojů používaných v celém procesu výroby skořepinové formy. U jednotlivých výrobních zařízení je naznačen základní princip činnosti daného stroje.

Závěr práce je věnován problémům a defektům, které mohou nastat při výrobě skořepinové formy. Každý z těchto problémů může mít za následek zhoršení vlastností skořepiny nebo vznik defektu. Při jejím použití dojde k výrobě zmetkového odlitku, a proto se těmto problémům snažíme vyvarovat.

Technologie přesné lití je perspektivní metodou k výrobě přesných a tvarově složitých součástí. Používá se také pro výrobu součástí u kterých je potřeba dosáhnout velké přesnosti, aniž by se součást po odlití musela ještě obrábět. Dále je metoda používána pro výrobu součástí, které jinou technologií nejsou možné vyrobit. Odlitky vyráběné touto technologií jsou dodávány širokému okolí průmyslových odvětví. Mezi ně například patří letecký, automobilový, energetický, vojenský, zbrojirenský a zdravotnický průmysl.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] eFUNDA. *Investment casting* [online]. 2009. [cit. 2009-03-14].  
Dostupné z:  
<[http://www.efunda.com/processes/metal\\_processing/invest\\_casting.cfm](http://www.efunda.com/processes/metal_processing/invest_casting.cfm)>
- [2] NOWAK. *Lost wax precision casting* [online]. [cit. 2009-03-14].  
Dostupné z: <<http://www.nowak.fr/english/cadreprocessflash.htm>>
- [3] BEELEY, PR. and SMART, RF. *Investment Casting*. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
- [4] DOŠKÁŘ, J., aj. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
- [5] HANZL, S.; RŮŽIČKA, A. *Metalurgie a technologie slévárenských slitin – díl II*, Praha. ČVUT, 1986
- [6] JONES, S., MARQUIS, P.M. *Role of Silica Binders in Investment Casting*. British Ceramic Transactions. 1995, vol. 94, No 2.
- [7] JONES, S., LEYLAND, S. *The Use of Conductivity as a Means of Assessing the Extent of Wet Back in an Investment Casting Mould*, 22nd B.I.C.T.A. Technical Conference, Bath, England, 11-13 September 1995
- [8] CONNOLY, S. JONES, S., CRITCHLEY, D., and MARQUIS, P. M. *Mould Non-Fill and its Relationship to Mould Wettability and Surface Finish in Thin Walled Castings*, 24th E.I.C.F. Conference on Investment Casting, Rome, Italy, 10th - 12th May, 1998.
- [9] MOULE, Robert. *The ceramic shell systém: The dinder* [online]. 2008 [cit. 2009-03-21]. Dostupné z:  
<[http://www.artenero.com.au/4\\_investment/shellsystem\\_8.html](http://www.artenero.com.au/4_investment/shellsystem_8.html)>.
- [10] RANSOM & RANDOLPH. *Ceramic shell castings* [online]. [cit. 2009-03-28]. Dostupné z: <<http://www.ransom-randolph.com>>.
- [11] REMET corporation. *Precision investment casting* [online]. [cit. 2009-04-11]. Dostupné z: <<http://www.remet.com>>
- [12] PACIFIC KILN & INSULATIONS. *Investment casting products* [online]. [cit. 2009-04-11]. Dostupné z:  
<<http://www.pacifickiln.com/investment.html>>
- [13] RANSOM & RANDOLPH. *Ceramic shell castings: Equipment* [online]. [cit. 2009-03-28]. Dostupné z:  
<<http://www.ransom-randolph.com/html/equipment.html>>
- [14] ABB GROUP. *Robotized investment castings* [online]. 2006. [cit. 2009-04-16]. Dostupné z: <[http://library.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/9f3c7514e02066a9c12572c70027e89e/\\$File/Case%20Investment%20TRYCK.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/9f3c7514e02066a9c12572c70027e89e/$File/Case%20Investment%20TRYCK.pdf)>
- [15] HORÁČEK, Milan. *Současné trendy v technologii vytavitelného modelu* [prezentace]. FSI VUT Brno, Odbor slévárenství ÚST. PRECAST 2006
- [16] LELAND, M., JAKSON, J., BARNES, E., MATZEK, Ch., NALLS, B., SNOW, J., WURSTER, B. *Atlas of Shell Defects*. Investment Casting Institute. New Jersey, USA. February, 2004.

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1    Součásti vyráběné pomocí technologie vytavitelného modelu  
Příloha 2    Součásti vyráběné pomocí technologie vytavitelného modelu  
Příloha 3    Součásti vyráběné pomocí technologie vytavitelného modelu