



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝROBA ODLITKŮ Z NEŽELEZNÝCH KOVŮ A SLITIN TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU

PRODUCTION OF CASTINGS FROM NON-FERROUS METALS AND ALLOYS BY THE TECHNOLOGY OF A  
INVESTMENT CASTING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marko Bednárík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Marko Bednárik</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

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:

## **Výroba odlitků z neželezných kovů a slitin technologií vytavitelného modelu**

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

Výroba odlitků metodou vytavitelného modelu využívá voskových modelů vyrobených v kovových formách. Obalovým způsobem je vytvořena skořepinová forma, do které je možné po vytavení vosku a vyzhánání skořepiny odlévat libovolné kovy a slitiny. Velice často je této technologii využíváno při výrobě přesných odlitků ze slitin hliníku a slitin železa a niklu. Podle odlévaného kovu jsou voleny i optimální výrobní podmínky skořepinové formy a podmínky odlévání. Použitá technologie má vliv na vnitřní a povrchovou jakost i výrobní náklady odlitku.

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je provést literární rešerši na téma výroby odlitků metodou vytavitelného modelu. Pro konkrétní odlitek provést výrobu odlitku technologií vytavitelného modelu s využitím voskových modelů vyrobených v silikonové formě. Výslednou povrchovou jakost odlitku porovnat s odlitky z nízkotavitelných slitin vyrobených do silikonových forem.

### **Seznam doporučené literatury:**

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

BEELEY, P.R. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 09-017-1666-9.

HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárství. Brno: Svaz sléváren ČR, 2001, (10). ISSN 0037-6825.

DOŠKÁŘ, J., J. GABRIEL. Výroba přesných odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

BEDNÁRIK Marko: Výroba odlitků z neželezných kovů a slitin technologií vytavitelného modelu.

---

Táto bakalárska práca popisuje proces výroby odliatku metódou vytavitelného modelu. Zahŕňa výrobu voskových modelov, zhotovovanie odlievacích sústava škrupinových foriem. Práca taktiež zahŕňa experimentálnu časť zameranú na výrobu zvolenej súčiastky metódou vytavitelného modelu a zrovnania tejto metódy s inými druhmi výroby.

Kľúčové slová: Technológia vytavitelného modelu, presné odlievanie, voskový model

## **ABSTRACT**

BEDNÁRIK Marko: Production of castings from non-ferrous metals and alloys by the technology of a investment casting

---

This bachelor thesis describes the process of production of the cast by the lost-wax casting method. It includes the production of wax models, creation of casting system and shell molds. The work also includes an experimental part focused on the production of the selected part by the method of the lost-wax casting and the comparison of this method with other types of production.

Keywords: Lost-wax casting, investment casting, wax model

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

BEDNÁRIK, Marko. *Výroba odlitků z neželezných kovů a slitin technologií vytavitelného modelu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/112949>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vítězslav Pernica.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Týmto prehlasujem, že predkladanú bakalársku prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho bakalárskej práce.

V Brne dňa 23.5.2019

.....

Podpis

## **POĎAKOVANIE**

Týmto chcem srdečne poďakovať pánovi Ing. Vítězslavovi Pernicovi, Ph.D. za vedenie pri tvorbe práce a pomoc pri experimentálnej časti. Ďalej si dovoľujem poďakovať pánovi docentovi Ing. Antonínovi Záděrovi za užitočné informácie. Moja vďaka taktiež patrí firme Moravia tech, a.s. a pánovi Petrovi Čundovi za pomoc pri experimentálnom pokuse.

# OBSAH

Zadanie	
Abstrakt	
Bibliografická citácia	
Čestné prehlásenie	
Poďakovanie	
Obsah	
Úvod	9
<b>1 ROZBOR ZADANIA A VARIANTY RIEŠENIA</b>	<b>10</b>
<b>2 TECHNOLÓGIA PRESNÉHO ODLIEVANIA</b>	<b>11</b>
2.1 <i>Formy a výroba modelov</i>	12
2.1.1 Ekonomické porovnania spôsobov výroby	15
2.2 <i>Vosk</i>	15
2.2.1 Vstrekolisy používané na výrobu voskových modelov	17
2.2.2 Modelové a vtokové sústavy	19
2.3 <i>Škrupiny</i>	20
2.3.1 Obaľovanie	21
2.3.2 Obalové hmoty	22
2.3.3 Spojivá	23
2.3.4 Vytavovanie vosku a vypaľovanie škrupín	24
<b>3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ</b>	<b>26</b>
3.1 <i>Lukoprénová forma</i>	27
3.2 <i>Séria odliatkov z cín-olovnatej spájky</i>	28
3.3 <i>Bronz a Hliník</i>	29
3.4 <i>Dvojsložková živica</i>	31
3.5 <i>Zhodnotenie</i>	32
<b>4 Závery</b>	<b>33</b>
Zoznam použitých zdrojov	
Zoznam obrázkov	
Zoznam tabuliek	
Zoznam príloh	



## Úvod

Výroba odliatkov technológiou vytaviteľných modelov je rozšírenou a veľmi používanou metódou pre zhotovovanie presných a často zložitých produktov ako je znázornené na obrázku 1. Označuje sa taktiež ako „lost wax process“ na margo faktu používania vosku pri drvinej väčšine výrobných procesov tohto typu i keď s rozvojom technológií 3D tlačiarň je v dnešnej dobe možné nechať si požadovanú súčiastku vytlačiť z plastu vyvinutého pre tento účel, ktorý sa dá vytavovať ako vosk. Napriek svojej zložitosti je v dnešnej dobe metóda vytaviteľných modelov veľmi rozšírená a používaná v mnohých odvetviach modernej priemyselnej výroby ako sú automobilový priemysel, zdravotníctvo, energetika, zbrojný priemysel, lodný priemysel a podobne. Časté využívanie tejto technológie napriek jej náročnosti spočíva hlavne vo veľkej kvalite finálnych odliatkov, na ktorých často nie je potrebné vykonávať dokončovacie úpravy, alebo iba v minimálnej forme.

Práca je zameraná na využitie procesu vytaviteľného modelu pre vytvorenie súčiastky podľa plastového LEGO® originálu. Praktická časť práce sa zameriava na porovnanie výsledných odliatkov vyrobených pomocou silikónovej formy, technológiou vytaviteľných modelov a dvojzložkovej živice v porovnaní s originálom. [1] [2] [3]



Obrázok 1 Ukážky voskových modelov a finálnych produktov vyrobených technológiou presného odlievania [1] [2] [3]

# 1 ROZBOR ZADANIA A VARIANTY RIEŠENIA

Model zvolený ako predloha pri praktickej časti práce je stará LEGO® súčiastka vyrábaná medzi rokmi 2005 až 2008. Táto helma bola zvolená kvôli projektu, v ktorom má slúžiť ako centrálny dekoratívny prvok. V dnešnej dobe ťažko dostupný diel by bolo nevýhodné kupovať na sekundárnom trhu v množstve potrebnom v projekte. Ako alternatíva boli zvolené rôzne varianty vytvorenia odliatkov. Výroba súčiastky je ovplyvnená náročnosťou a presnosťou ako aj finančnými nákladmi na kus pri menších sériách. Podľa týchto faktorov sú použité metódy, ktoré prinášajú zaujímavé výhody ako aj komplikácie v niektorých aspektoch.

Originálny model bol zhotovený technológiou vstrekovania plastu, čo poskytuje vysokú kvalitu povrchu pri nízkej váhe odliatku, no prináša nevýhody pri cene výroby formy pre takúto súčiastku ak sa jedná o pomerne malokusovú výrobu. Táto technológia taktiež nie je ľahko dostupná a preto na jej realizáciu potrebujeme vysoko špecializované pracoviská. Pre zhotovenie experimentálnej časti boli zvolené nasledujúce metódy:

- I. Prvou metódou zvolenou na zhotovenie súčiastky pri menších výrobných nákladoch s čo možno najlepšimi vlastnosťami povrchu je použitie silikónovej formy z materiálu schopného vydržať teplotnú záťaž pri odlievaní z kovov s nízkou teplotou tavenia. Ako materiál formy bol zvolený kaučuk Lukoprén N1522, do ktorého je možné odlievať cín olovnatú spájku. [4]
- II. Druhým spôsobom testovaným v rámci experimentu bol pokus, pri ktorom bola použitá lukoprénová forma vyrobená pre metódu odlievania z cín olovnatej spájky. V tomto prípade slúžila ako odlievací materiál dvojzložková živica Ebalta SG 2000. Hlavnou výhodou tejto metódy je dosiahnutie nízkej váhy vyrobených odliatkov pri zachovaní či dokonca miernom zlepšení povrchu odliatku oproti odlievaniu z Cín olovnatej spájky. Predpokladaným problémom tejto metódy bola neúčinná výroba odliatkov. Inak povedané nemožnosť recyklácie znehodnotených výrobných kusov na rozdiel od prvej používanej metódy, kde vieme veľmi efektívne recyklovať akékoľvek kazové exempláre v kusovej výrobe. Pri použití tejto metódy sa akýkoľvek kazový odliatok odzrkadlí na celkovej spotrebe materiálu ako čistá strata. Forma bola pred použitím očistená, ale nebolo nutné robiť nijaké úpravy v štruktúre prevedenia, uchytení či vnútornom odvzdušňovacom systéme. [5]
- III. Tretím spôsobom je bližšie rozoberaná metóda vytaviteľného modelu, ktorá umožňuje rozšírenie možností výroby finálneho dielu čo sa použitia rôznych materiálov týka. Pre tento experiment boli zvolené bronz pre svoj povrchový vzhľad a hliník kvôli svojim váhovým vlastnostiam. Taktiež však prináša obmedzenia v podobe vyšších nákladov na výrobu a doby dodania samotných finálnych odliatkov. Ďalším z očakávaných problémov tejto metódy bolo samotné vybúravanie skúmaných malých tenkostenných odliatkov z odlievacej škrupiny spôsobom takým, aby nedošlo ku znehodnoteniu vyhotovovanej série. Pre zhotovenie voskových modelov bola aj v tomto prípade použitá rovnaká lukoprénová forma užívaná v predchádzajúcich metódach (Cín olovnatej spájky a dvojzložkovej živice Ebalta). Lukoprénovú formu nebolo ani v tomto prípade nutné meniť v rámci jej vnútornej štruktúry avšak zhotovovanie samotných voskových odliatkov si vyžadoval špecializovaný výrobný postup.

## 2 TECHNOLÓGIA PRESNÉHO ODLIEVANIA

V širšom slova zmysle sa môžu za presné odlievania označovať všetky metódy odlievania, ktoré dovoľujú vyrobiť presnejšie odliatky než bežné zlievarenské metódy. Podľa tejto definície patria medzi presné odlievania metódy ako napríklad tlakové či kokilové odlievanie, odlievanie do lisovaných keramických foriem a samozrejme odlievanie metódou vytaviteľného modelu. Správne by však bolo používať termín presné odlievania iba na metódy schopné vyrobiť odliatky s relatívne veľkou presnosťou. V tomto pojatí patria medzi presné odlievania metódy vytaviteľného, vypariteľného alebo rozpustného modelu. [6]

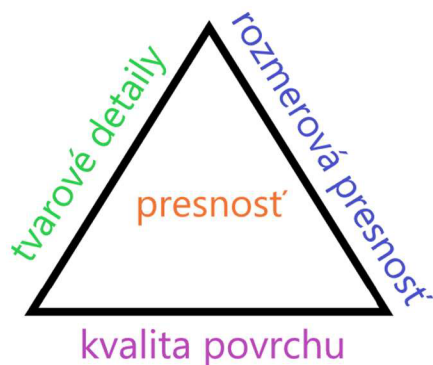
V tabuľke 1 sú uvedené údaje o presnosti metód, ktoré sa v širšom slova zmysle radia medzi metódy presného odlievania. Pre porovnanie presností metód je v tabuľke uvedený aj údaj tejto hodnoty dosiahnuteľný klasickým odlievaním do pieskových foriem. [6]

Tab. 1 Prehľad metód odlievania a dosiahnuteľných rozmerových presností. [6]

Metóda odlievania	Dosiahnuteľná optimálna tolerancia pre menovitý rozmer 30 až 50 mm
Vytaviteľný model	$\pm 0,03$ až $\pm 0,1$ mm
Tlakové odlievanie	$\pm 0,05$ až $\pm 0,2$ mm
Kokilové odlievanie	$\pm 0,1$ až $\pm 0,3$ mm
Odlievanie do piesku	$\pm 1$ až $\pm 2$ mm

Hodnoty ukazujú, že zo všetkých uvedených metód je najpresnejšia metóda vytaviteľného modelu. Tabuľka 1 však nevyjadruje všestrannosť tohto výrobného procesu, nakoľko sme s ním schopný vyrábať odliatky veľmi zložitú, v presných dutinami otvormi a drážkami.

Koncept presnosti môžeme pozorovať aj na obrázku 2., ktorý vyzdvihuje nielen aspekt rozmerovej presnosti a tolerancie, ale aj povrchovej kvality a schopnosti reprodukovať spleť detaily modelu. Každý z týchto aspektov sa môže javiť ako kľúčový pri zhodnocovaní metód pri výrobe odliatkov. [7]



Obrázok 2 Závislosť presnosti na aspektoch odliatku [7]

Presné odlievanie charakterizujeme ako metódu schopnú vyrábať odliatky o takej kvalite, že nie je nutné robiť dokončovacie úpravy. Pri plochách ktoré treba aj po odlievaní opracovávať sa jedná iba o minimálne úpravy, ktoré šetria jednak čas dokončenia súčiastky a zároveň zníženie nákladov na výrobu sú o poznanie nižšie ako v porovnaní s inými metódami. [6] [8]

Odliatok napriek tomu nikdy nie je dokonalý, pokiaľ sa jedná o samotnú veľkosť a tvar. Pre tento dôvod sa na výkresoch uvádzajú tolerancie. Žiadne dva odliatky nie sú totožné. ISO normy pre tolerancie odliatkov

uvádzajú že navzdory rôznym technológiám výroby je možné dosiahnuť odlišné presnosti a obecné platí: čím väčší je menovitý rozmer tým stúpajú nepresnosti odliatkov. [9]

Fakt, že metódou vytaviteľného modelu je možné dosiahnuť výrobu tvarovo veľmi zložitých odliatkov s veľmi dobrou akosťou povrchu stavia túto metódu do popredia pri výrobe veľmi náročných odliatkov a zároveň úsporu financií, kde by sa konvenčné metódy ukázali ako príliš nákladné či dokonca neschopné splniť výrobné požiadavky danej súčiastky. Pre príklad je možné uviesť aspoň súčiastky vyrábané pre tepelnú techniku, atómovú techniku či zbrojársky priemysel. [6]

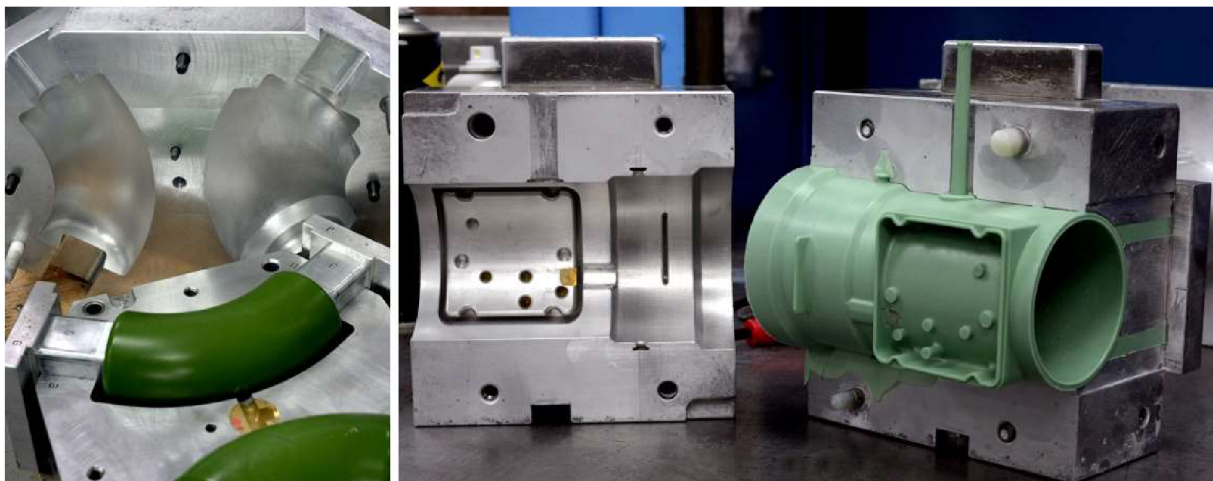
Technológia vytaviteľného modelu bez sporu zaujala jedno z popredných miest v zlievarenskej technológii. Za posledných 50 rokov sa vyvíjala z metódy vysoko špecializovanej na metódu rozšírenú a pomerne bežne používanú, odzrkadľujúcu požiadavky zákazníkov na odliatky o vysokej tvarovej a rozmerovej presnosti ako aj materiálovej náročnosti. Jedná sa o metódu ponúkajúcu cestu k priamej, efektívnej a ekonomickej ceste ku výrobe konečnej súčiastky. [9]

Pre tieto kľúčové aspekty bola táto metóda zvolená pre realizáciu experimentálnej časti, pretože vyrábaná súčiastka obsahuje dutiny a samotný rozmer a tvar prakticky znemožňuje inú metódu schopnú realizovať daný experimentálny problém v porovnateľnej kvalite a cene.

## 2.1 Formy a výroba modelov

Základným predpokladom pre výrobu presného odliatku je presný model s povrchom bez väd a presne dodržanými rozmermi, ktoré rešpektujú všetky technologické vplyvy vyskytujúce sa pri výrobe. K vyrobeniu takého odliatku musí byť k dispozícii veľmi presne vyrobená forma (obrázok 3). Pri uvažovaní či sa má daný odliatok vôbec metódou vytaviteľného modelu vyrobiť, býva často kľúčová otázka nákladov na výrobu matricového modelu a formy na model. Môže sa totiž stať, že náklady na výrobu modelu a jeho formy presiahnu úspory ktoré prináša samotné odlievanie touto metódou v porovnaní s obrábaním. Preto musia formy na vytaviteľné modely spĺňať tieto základné požiadavky:

- a) Musí umožniť výrobu zdravých modelov s dokonalým povrchom. To znamená schopnosť vytvorenia voskového modelu bez prepادلín, sťažení, vzduchových bublín a iných nežiadúcich povrchových kazov nakoľko sa výrazne ukážu na výslednom produkte.
- b) Doba nutná pre vytvorenie daného voskového modelu by mala byť čo najkratšia. [6]



Obrázok 3 Ukážky foriem pre výrobu voskových modelov [10]

Táto podmienka zahŕňa hlavne veľkovýrobu, pri menších sériách môžu byť nároky na rýchlosť výroby modelov nižšie, vždy sa však kladie dôraz na vysokú presnosť a výslednú kvalitu voskového modelu. [10]

Podľa účelov sa dajú formy rozdeliť na:

- k výrobe vlastných modelov
- k výrobe pomocných častí, akými sú napríklad vtoky, jadrá či náliatky

Podľa konštrukcie sa ďalej formy delia na:

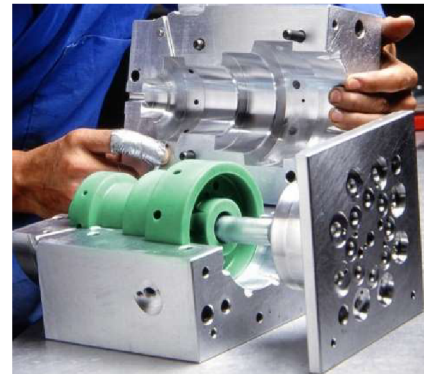
- samostatné pre jeden model
- samostatné pre viacero modelov
- vo forme výmenných vložiek do upínacích stolíc pre vstrekolisové stroje

Podľa stupňa mechanizácie sa formy ďalej rozdeľujú na:

- jednoduchú s ručným vyberaním odliatkov
- s vyhadzovaním modelov
- s jadrami alebo časťami foriem ručne alebo mechanicky rozoberateľnými
- úplne mechanizované či automatizované

Rozhodujúci vplyv na cenu formy má predovšetkým jej zložitosť, s ktorou súvisí pracnosť výroby a potom materiál. Toto sú činitele, o ktorých rozhoduje technolog a konštruktér pri navrhovaní formy. Obaja sa pritom riadia požiadavkami na odliatok a veľkosťou finálnej série. Podľa spôsobu výroby sú formy členené:

- *Formy vyrobené obrábaním* (obrázok 4) sa používali na výrobu vytaviteľných modelov ako jedny z prvých. Ich výroba sa od výroby ostatných foriem líši v tom, že nepotrebuje ku zhotoveniu dutiny maticový model, forma aj s dutinou sa vyrobí na obrábacích strojoch. Konštrukcia formy jednoduché odliatky bez vnútorných dutín je pomerne jednoduchá. Omnoho nákladnejšia a zložitejšia je samozrejme výroba foriem na zložité a členité odliatky. Modely s tvarovým členením či vnútornými dutinami alebo tvarovým členením, ktoré nemajú rovnobežné osi so smerom otvárania formy či dokonca obsahujú osi ležiace mimo deliacej plochy, musia mať výsuvné jadrá ktorých výroba, inštalácia a lícovanie vo forme sú veľmi prácne. Materiál na výrobu týchto foriem býva z pravidla oceľ a zliatiny ľahkých kovov. Hliníkové zliatiny majú pre tento účel lepšiu tepelnú vodivosť. V odliatkoch zo zliatin hliníku sa však môžu vyskytovať póry. Formy sa vyrábajú z pravidla v 6. stupni IT a s drsnosťou povrchu 0,4 až 0,8 $\mu$ . Modely z týchto foriem sú najpresnejšie, ale zároveň technologicky veľmi náročné. Formy sú z hľadiska životnosti veľmi trvanlivé. [6] [11]
- *Formy z nízko tavitelných zliatin* (napríklad formy zo zliatiny Pb-Sb) sa vyrábajú zaliatím kovového maticového modelu usadeného v ocelovom plášti, nízko tavitelnou zliatinou. Každá polovica formy je z inej zliatiny s rôznymi teplotami tavenia. Nízko tavitelná zliatina sa nesmie prehriať o viac ako 30 až 40 °C nad bod tavenia. Mohlo by totiž dôjsť ku prepáleniu čo by malo za následok zmenu zloženia z eutektického a tým pádom po zatumnutí formy aj hrubozrnnosť odliatej formy. Forma sa po stuhnutí kovov rozoberá a vyberie sa maticový model. Deliaci rovina sa upraví podľa potreby, vyhadzovače a strediaci kolíky sa vyrobí obrábaním, otvory pre samotné vyhadzovače sa získajú zaliatím vyhadzovačov alebo pomocných trňov do druhej polovice formy. Druhá polovica formy sa vyrobí naliatím zliatiny s nižšou teplotou tavenia na prvú polovinu formy. Pred týmto krokom je nutné opatriť prvú polovicu formy s modelom začadením od horiaceho oleja, ktorý funguje ako separátor. Forma sa následne rozoberá a drobné vady sa dopraví podľa potreby a požiadaviek. Modely z takto vyrobených foriem majú kvalitný povrch a vyhovujúcu povrchovú presnosť, formy však nie sú moc trvanlivé preto sú vhodné pre výrobu menšieho počtu voskových modelov. Taktiež sa nehodia pre veľko-rozmerové modely vzhľadom ku nákladom na výrobu takýchto foriem pri cenách nízko tavitelných zliatin. [6] [12]
- *Formy zo zinkových zliatin* sa vyrábajú zalievaním maticových modelov zinkovou zliatinou do ocelových plášťov. Oproti formám z nízko tavitelných zliatin sú formy zo zliatin zinkových tvrdšie a odolávajú tepelnému opotrebeniu aj poškodeniu nárazom. Majú preto väčšiu životnosť. Výroba foriem zo zliatin zinku bez tlaku je jednoduchá



Obrázok 4 Forma pre výrobu voskových modelov [11]

a lacná, tento postup avšak nie je vyhovujúci pri modeloch so zložitou deliacou rovinou, pretože príprava deleného matricového modelu je v tom prípade zložitá a nákladná. Taktiež zlíčovanie oboch polovín po vyrobení je náročnejšie. Formy zo zinkových zliatin majú dobrú životnosť a sú pomerne málo nákladné v pomere ku ich kvalite. Sú preto vhodné pre veľkosériovú výrobu voskových modelov. Avšak nehodia sa pre modely s veľkými dutinami či bočnými či šikmými jadrami. [6]

- *Formy vyrábané zalieváním matricového modelu plastickými hmotami* (obrázok 5) sú pomerne veľmi jednoduché na výrobu, a preto v porovnaní s ostatnými metódami lacné. Nie sú však trvanlivé, preto sa hodia na odliatky modelov menších sérií, u ktorých buď nie sú nároky na veľký počet opakovaní alebo sa nepredpokladá s veľkou produkciou daného modelu. Na výrobu foriem sa používajú najčastejšie živice, či silikóny. Vzhľadom na to že plastické hmoty majú podstatne nižšiu tepelnú vodivosť než kov, mali by sa používať na modely malých rozmerov aby bolo tuhnutie voskového modelu správne. Najlepší matracový model je kovový, leštený, ale vhodné sú aj plastové či drevené modely. Povrchová akosť



Obrázok 5 Príklad silikónovej formy [13]

- a presnosť týchto foriem avšak nikdy nedosiahne úroveň kovových foriem. Matricový model sa najprv opatrí tenkou vrstvou oddeľovacieho materiálu (separátora) pre lepšie oddelenie od hotovej formy. Odliata forma musí byť hladká – pórovitý povrch spôsobuje nechcené vady na voskových modeloch. Separátor sa nanáša štetcom po veľmi tenkých vrstvách aby sa čo najdokonalejšie odkopíroval povrch súčiastky/ matricového modelu, väčšina separátorov má veľmi malú viskozitu preto nanášanie nie je zväčša problémové. Živica sa na model nanáša čo najrýchlejšie s ohľadom na problematiku vzduchových bublín, ktoré sa môžu uzamknúť v nalievanej hmote a znehodnotiť tak formu. [6] [13]
- *Formy vyrábané zaliatím matricového modelu kaučukovými hmotami* sa používajú k výrobe voskových modelov s menšími požiadavkami na rozmerovú presnosť. Rovnako ako pri silikónových formách, aj táto metóda je v porovnaní s ostatnými lacná, ale zároveň rýchla. Bohužiaľ taktiež nie je moc trvanlivá a rovnako sa hodia na výrobu menších sérií modelov. Vzhľadom na to, že kaučukové hmoty majú podobne zlú tepelnú vodivosť ako silikónové formy, sú rovnako vhodné na menšie odliatky. Výhoda tejto metódy spočíva v možnosti použitia prakticky čohokoľvek ako matricový model. Veľmi vhodné sú taktiež modely z kovu, plastu ale aj dreva. Presnosť modelov tu taktiež nedosahuje kvality u kovových foriem. Avšak veľkou výhodou kaučukových materiálov zostáva možnosť výroby negatívnych úkosov vďaka ohybnosti materiálu ktorá dovoľuje vytiahnutie zložitých voskových modelov z foriem. Ďalším bonusom použitia tejto metódy je jednoduchosť výroby formy. Model sa ako predtým opatrí tenkou vrstvou separátora a následne sa zamodeluje pomocnou hmotou do výšky deliacej roviny. Po dokončení sa z modelu odstráni pomocná hmota a doleje sa druhá časť formy (je taktiež možné vyrábať 3 a viac členné formy bez väčších komplikácií). Po vybratí modelu z formy sa forma opatrí vtokovým kanálom a odtokovými kanálkami ak sú potrebné pre danú technológičnosť výroby. Formy z kaučuku v kovových rámčekom je taktiež možné používať vo výrobe modelov pomocou vstrekovacieho stroja s malým vstrekovým tlakom. Vo formách bez rámčeka je možné odlievať modely

gravitačne ako tomu je aj v praktickej časti tejto práce. Veľmi malá tepelná vodivosť kaučukových foriem síce predlžuje cyklus výroby modelov, avšak umožňuje dokonalé vyplnenie dutiny formy modelovou hmotou, takže povrchy modelov sú veľmi kvalitné aj v miestach negatívnych úkosov a zložitých tvarov. [6]

### 2.1.1 Ekonomické porovnania spôsobov výroby

Pôvodne sa vyrábali formy na vytaviteľný model celé z kovu obrábaním. V snahe na zníženie nákladov na túto metódu a tým aj rozšírenia možnosti využitia technickej praxi, boli hľadané iné lacnejšie, rýchlejšie metódy výroby foriem. Porovnanie rôznych metód spôsobov výroby je v tabuľke 2. [6]

Tab. 2 Technické možnosti foriem používaných na výrobu voskových modelov. [6]

Spôsob výroby	Náklady [%]	Stupeň presnosti	Doba tuhnutia [s]	Počet modelov vyrobených na 1 formu
Obrábanie z oceli	100	1	-	30 000 až 120 000
Nízkotavitel'né zliatiny	75	2	80	5 000 až 7 000
Zinkové zliatiny	75	3	80	15 000 až 20 000
Epoxidové živice	33	4	140	do 500
kaučuk	20	5	180	do 200

## 2.2 Vosk

Znalosti vlastností voskových zmesí je základným predpokladom pre výrobu akostného odliatku metódou presného odlievania. Nekvalitný voskový model znamená vždy chybný odliatok, a to aj v prípade, že zbytok technologického postupu je bezchybný. Dôležitým faktorom kvality voskového modelu sú jeho rozmery a ich stálosť, ovplyvňujúce konečné rozmery odliatku. Ten musí vo finálnom stave korešpondovať s požiadavkami zákazníka. Pre lepšiu vizualizáciu môžeme na obrázku 15 pozorovať bežne používaný vosk vo forme granúl. [7] [14] [15]

K výrobe takýchto vytaviteľných modelov sa používajú výhradne voskové zmesi, pretože žiadny jednoduchý vosk nespĺňa všetky požiadavky kladené na modelovú hmotu. Okrem kombinácii voskov sa taktiež používajú aj prídavky plastických hmôt, ktorými sa zlepšujú hlavne mechanické vlastnosti modelovacích zmesí. [6]



Obrázok 6 Vosk vo forme granúl [15]

Moderné voskové zmesi sa skladajú z mnohých zložiek, ako sú prírodné uhlíkovodíkové vosky, prírodné esterové vosky, syntetické vosky, prírodné a syntetické živice, organické palivá a voda. Pomerne komplikované a zložité zloženie voskových zmesí vyplýva z potreby splniť náročné požiadavky na ich konečné vlastnosti. Jednotlivé zložky upravujú fyzikálne mechanické vlastnosti ako sú napríklad : bod tavenia, tvrdosť, viskozitu či objemové zmeny.

Vlastnosti jednotlivých zložiek vyplývajú z ich atómovej štruktúry. Väčšina z uvedených voskov má reťazovú štruktúru uhlíkových atómov (i keď sa vyskytujú aj vosky z neretazovou štruktúrou). Pre materiály s reťazovou štruktúrou platí, čím dlhšie sú atómy tým je vyšší bod tavenia, bod tuhnutia a tvrdosť. Dĺžka reťazov taktiež ovplyvňuje viskozitu a rozpustnosť.

Ak zvážime koľko rôznych zložiek obsahuje bežne používaná vosková zmes, dôjdeme ku záveru že chovanie týchto zmesí je komplikovaný problém. Každý z komponentov ovplyvní výsledný produkt nejakým spôsobom. Nakoľko sú tieto body kriticky dôležité pre výrobu funkčných modelov je nutné aby sa tieto premenné upresnili zo strany zákazníka. Po odsúhlasení oboma stranami je vždy veľmi dôležité aby sa daný zvolený vosk dodával v presne vymedzených bodoch kvôli správne mu priebehu výroby v tabuľke 3: nájdeme kľúčové body ovplyvňujúce vosk. [7]

Tab. 3 Kľúčové body ovplyvňujúce chovanie vosku. [6] [7]

<b>1. malé zmrštenie pri tuhnutí a tým aj malá rozťažnosť pri vyšších teplotách</b>
<b>2. dostatočná stabilita, pevnosť a tvrdosť</b>
<b>3. dostatočná pružnosť aby bolo možné bezpečne manipulovať s modelom</b>
<b>4. musí presne reprodukovat' formu</b>
<b>5. nesmie sa lepiť či korodovať kovové formy</b>
<b>6. nesmie zanechať v keramickej forme žiadne zbytky, nízky obsah popola</b>
<b>7. nesmie byť napadnuteľná obalovými hmotami</b>
<b>8. vhodná viskozita</b>
<b>9. odolávanie oxidácii</b>
<b>10. dostupnosť a hygienická nezávažnosť</b>

Väčšina používaných modelovacích hmôt zaručuje kvalitný finálny povrch modelu, čo v praxi znamená vernú reprodukciu vnútornej schémy formy. Taktiež rozmery modelov sa dajú pomerne jednoducho zaručiť či už samotnou formou o vysokej kvalite alebo minimálnymi prídavkami na dokončovacie úpravy ak sú potrebné. Najobťaženejšie je zaručiť presnú geometriu modelu pretože modelová hmota pri tuhnutí mení rozmer čo sa prejavuje obzvlášť nepriaznivo pri modeloch o veľkom objeme alebo naopak pri častiach modelov s rozdielnymi hrúbkami stien. Čiastočne sa tvorbe povrchových deformácií dá zabrániť zvyšovaním tlaku, či vkladáním tuhých kúskov vosku do formy, takzvaných „chladítok“ alebo jadier. Ďalším zaujímavým spôsobom zabraňovania tvorby nedokonalostí je použitie takzvaného plneného vosku. V tomto prípade sa vosková zmes naplní vodou, vzduchom či práškovou tuhým hmotou.

Druhy používaných voskových zmesí sú:

- *Vosky na modely* sú určené primárne k výrobe voskových modelov. Väčšina sa dá regenerovať. Ďalej sa špecifikujú na:

→ *Neplnené (priame) vosky*

Je možné vstrekať vo veľkom rozpätí teplôt. Veľkou prednosťou je ľahká regenerácia vosku, taktiež aj nízky obsah popola a vysoká kvalita povrchu modelu. Modely môžu na druhej strane trpieť mnohými prepadlinami v miestach nahromadeného materiálu čo vieme potlačiť celkovým chladením matracových foriem prípade užitím spomínaných metód na potlačenie tohto chovania.

→ *Emulzifikované vosky* majú podobné vlastnosti ako neplnené vosky s tým rozdielom že obsahujú plnivo, ktoré je voda či vzduch. Prítomnosť týchto plnív



– emulzifikátorov – znižuje výskyt prepadlín a zároveň zvyšuje rozmerovú stabilitu modelu. Obsah plnív sa pohybuje v okolí 10% pre vzduch a dokonca až 20% pri použití vody. Takto zhotovované modely sa vyrábajú na vstrekolisoch s užitím nižších tlakov.

→ *Plnené vosky* patria v súčasnosti medzi najpoužívanejšie modelové vosky. Sú vhodné najmä pre zložité a tenkostenné modely, ktoré sa zhotovujú na vstrekolisoch. Plnivom (od 20% až do 40%) je organická látka v podobe prášku, nerozpustná v základnom vosku. Užitie práškového plniva taktiež zlepšuje rozmerovú stabilitu modelu a zabraňuje tvorbe prepadlín. [14]

- *Vosky na vtokové* sústavy majú skoro rovnaké zloženie ako neplnené vosk. Zmes je upravená tak, aby mala vyššiu pevnosť a bola schopná uniesť, ak je to nutné, hmotnosť modelu. Na vtokové systémy sa využívajú aj regenerované priame modelové vosky. [14]
- *Vodou rozpustné vosky* sú vo svojej podstate plnené vosky zo špeciálnych látok, ktoré sú rozpustné vo vode alebo slabých kyselinách. Používajú sa na výrobu voskových, vodou vyplatiteľných jadier. Pomerne dobre sa odstrekujú, majú pomerne dobrú rozmerovú stabilitu a dostatočnú odolnosť voči prepadávaní. [14]
- *Špeciálne vosky* zahŕňujú škálu špecializovaných voskových zmesí používaných na podporu klasických voskových zmesí. Používa sa napríklad namáčací vosk s nízkou viskozitou určený pre zmenšenie nebezpečenstva vzniku trhlín pri škrupinových formách počas vytavovania vosku autoklávom. Taktiež môžeme nájsť špeciálne vosky určené na opravy poškodených modelov, či vosky určené predovšetkým na lepenie častí modelov a finálneho modelu samotného ku vtokom. [14]
- *Regenerované a rekonsistované vosky* sa získavajú z čiastočne znehodnotených voskových zmesí (zmes stráca potrebné technologické vlastnosti). Takto znehodnotená vosková zmes môže byť znovu použitá iba v prípade, že prejde procesom recyklácie. Recykláciou dochádza k úplnej alebo čiastočnej obnove technologických vlastností vosku, úspore financií a šetreniu životného prostredia. Recykláciu modelových voskových zmesí delíme na:
  - Regeneráciu – jednoduchý proces, ktorým vzniká iba vosk vhodný na výrobu vtokových súprav
  - Rekonštitúciu – pokročilý proces recyklácie, ktorým vzniká vosk vhodný aj na opätovnú výrobu modelov. Vosk sa čistí a dôkladne filtruje. Následne sú pridané nové zložky, ktoré zaručia pôvodné požadované vlastnosti voskovej zmesi. Rozmerová presnosť modelov a rekonštituovaného a panenského vosku je takmer totožná. [14]

### 2.2.1 Vstrekolisi používané na výrobu voskových modelov

Vstrekovače vosku sú stroje ktoré berú predpripravený vosk a vstrekujú ho do foriem, vytvárajúc voskové modely. Na obrázku 7 si môžeme všimnúť tlakový voskový injektor používaný pri väčších formách s vyšším objemom vosku. [7]

Vstrekolisi sa klasifikujú podľa vosku ktorý je stroj schopný užívať. Existujú 3 základné typy injektorov:

- ❖ *Injektory tekutých voskov* používajú vosk v tekutej podobe, ktorá konzistenčne pripomína hmoty v rozpätí od oleja až po med. Tekuté injektory pozostávajú zo zahriateho voskového rezervoára upraveného tak, aby zabraňoval



Obrázok 7 Vstrekolis vosku [16]

únikom vosku. Vosk je transportovaný zo zásobníku ku vstrekovaciemu nástroju pomocou vákua vytvoreného pohybom hydraulického či pneumatického cylindru, a samotnou hmotnosťou vosku v rezervoári. Forma sa upne do nástroja ak sa jedná o automatizovaný model pričom sa roztavený vosk vtlačí do pevne uzavretej formy pod prednastaveným tlakom ktorý následne drží po dobu určeného času. Po ubehnutí tejto doby je vosk stuhnutý a vychladnutý na dostatočnú teplotu pre bezpečné vybranie z formy. Tekutý injektor je nutné dopĺňať pravidelne, upravovaným voskom, pre najlepšie výsledky. Vosk, ktorý by sa do zásobníku vkladal moc studený by mohol zapríčiniť zachytenie vzduchových bublín v objeme vosku a tým znehodnotiť vyrábané produkty. Vosk dopĺňaný s moc vysokou teplotou môže prehriať celý odlievací systém, čo by malo za následok nedostačujúce ochladenie modelu. Takto vytvorený model môže obsahovať prepadnuté či zdeformované steny a povrchy a taktiež nemôže byť ďalej použitý. [7] [16]

❖ *Pastové injektory* užívajú pri práci vosky o konzistencii na spektre od zubnej pasty až po ovocnú kašu. Momentálne existujú 2 základná typy injektorov užívajúcich pastovú náplň:

- Kanistrové injektory sú prvým druhom pastových injektorov. Zásobník či kanister vosku sa vloží do pece alebo ohrievacieho zariadenia za účelom roztavenia materiálu. Po upravení vosku na predom stanovenú teplotu sa zásobník vloží do prístroja ktorého komponenty manipulujúce s voskom sú zohriate na manipulačnú teplotu aby nedošlo ku podchladeniu či ztuhnutiu vosku pri prechode strojom. Následne sa na vstrekovaciu hlavu pripojí forma, niektoré druhy strojov obsahujú viacero vstrekovacích hláv umožňujúcich mnohonásobné napĺňanie foriem paralelne. Pri manipulácii s týmto druhom zariadenia je nutné brať do úvahy teplotu a viskozitu vosku pri plnení zo zásobníka do stroja aby bol vosk dostatočne tekutý a umožnil bublinám vzduchu vyplávať na povrch predtým než naberie správnu teplotu a viskozitu.
- Druhým typom pastového vstrekolisu je takzvaný hybridný prístroj využívajúci aj tekutý vosk v dvoj fázovom voskovom rezervoári. Vrchná časť rezervoáru sa udržuje na vysokej teplote aby bol pridávaný vosk dostatočne tekutý a vedel sa efektívne odvzdušniť. Spodná sekcia pozostáva z chladiacej sústavy schopnej upraviť vosk na akúkoľvek požadovanú teplotu a zároveň premiešať vosk od stien s viac prehriatym voskom v centre rezervoáru čím vytvorí voskovú kašu. Tento druh stroja musí byť zabezpečený kontinuálnym zásobovaním tekutého vosku do hornej časti rezervoára pre správne fungovanie miesiča. Zbytok stroja funguje ako klasický pastový vstrekolis.

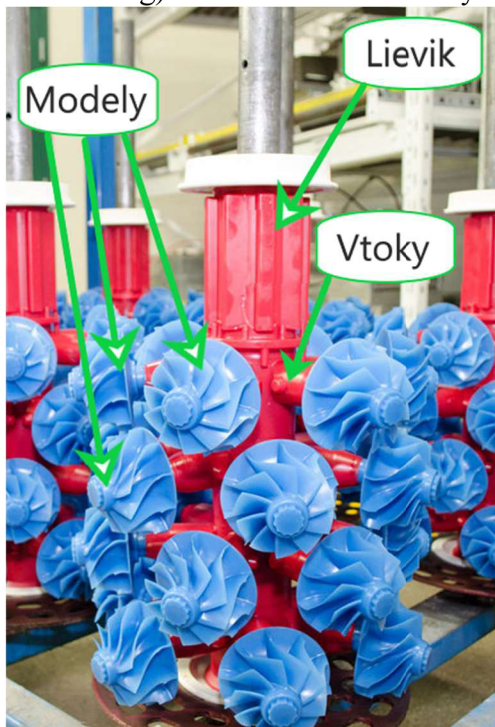
❖ Injektory pevného vosku využívajú tepelne predpripravené voskové tuby. Tieto tuby sú zahriaty vosk, ktorý zachováva svoj tvar aj mimo stroja. Tomuto vosku klesá viskozita pri zvýšení tlaku prechodom skrz vstrekovaciu súpravu, čím je možné vosk vstreknúť a vyplniť predpripravenú formu. [7]

Injektor tekutých voskov je najpopulárnejší pri výrobe. Benefituje z faktu, že tekutý vosk je jednoduchšie dopravovať do prístroja pomocou centrálnej voskovej zásoby, ktorá umožňuje ľahšie udržiavanie hladiny vosku a tým vyžaduje minimálnu obsluhu. Vyššie teploty vosku na druhú stranu zapríčiňujú dlhší cyklus chladnutia a väčšiu pravdepodobnosť stiahnutí vo finálnych voskových modeloch. Výrobcovia vosku sa snažia tieto problémy riešiť pridávaním rôznych náplní do voskov. Injektory pastových a tuhých voskov síce pracujú s nižšou teplotou vosku no na druhú stranu prinášajú aj viaceré problémy. Dopĺňanie takýchto strojov je pracné a špeciálne pece na ohrev a udržiavanie teplôt vosku zaberajú cenné miesto vo výrobe. Stroje pracujúce s hybridnými tekutými pastovými voskami prinášajú kompromis, no potrebujú špeciálny zásobník, ktorý musí navyše pokryť požiadavky na rýchlosť výroby stroja. [7]

### 2.2.2 Modelové a vtokové sústavy

Modely drobných odliatkov, ktoré sa vyrábajú v skupinách či jednotlivu, sa zostavujú do sústavy nazývanej „stromček“. Stromček sa skladá z väčšieho počtu modelov, spojených jednotlivými vtokmi s vtokovou sústavou, ktorá musí zaisťovať výrobu odliatkov s dobrou vnútornou akosťou. Táto vtoková sústava býva pri hromadnej výrobe odliatkov štandardná. Tvar stromčeku, jeho konštrukčné prevedenie a umiestnenie odliatkov ovplyvňujú: [6]

- a) spôsob pripojenia modelov,
- b) obalovanie,
- c) vytavovanie,
- d) spôsob odlievania,
- e) plnenie formy tekutým kovom,
- f) spôsob oddeľovania jednotlivých odliatkov od vtokovej sústavy,
- g) štandardizácia vtokových sústav. [6]



Obrázok 8 Príklad zostaveného stromčekového systému [17]

Na obrázku 8 môžeme pozorovať jednotlivé časti stromčekovej sústavy voskových modelov. Modely vyrábané v sériách sa lepia na vtokovú sústavu voskovým lepidlom. Pri nalepovaní modelov je nutné dbať na to, aby lepidlo zmáčalo celú plochu vtoku, a zároveň aby pri potlačení modelu ku vtokovej sústave vytvorilo súvislý prstencový pretok, ktorý je asi o 2 mm väčší ako priemer vtoku. Modely popripáde vtokové sústavy sa nalepajú rôznymi lepiacimi technikami.

Spájkovaním sa pripojí model na vtokovú sústavu tak, že sa medzi vtok modelu a vtokovú sústavu vloží nahriata spájka. Model sa priloží na spájadlo v mieste kde bude upevnený, po natavení oboch dopadových plôch sa spájkovací nôž vytiahne a model sa, pod tlakom, priloží na svoje miesto. Montáž modelov spájkovaním je metóda pomerne produktívna a spojená s vysokou kvalitou výsledných stromčekov. Natavená plocha vytvára v mieste lepenia zaoblený prechod čím efektívne odstraňuje vrubový činiteľ a tak zvyšuje pevnosť spoja.

Tvar stromčeku, čiže vtokový systém s vhodným umiestnením určitého počtu modelov, musí byť riešený tak, aby bol ku pripojeniu modelov dostatočný prístup, pričom sa nesmú pri spájaní poškodiť prilepované modely. [6] [17]

Z hľadiska obalovania majú byť modely na stromčeku pripájané dutinami smerom dole. Sústava modelov musí umožňovať dobré vytekanie vosku pri vytavovaní modelov zo škrupiny. U niektorých modelov sa vyskytuje viac zmätkov následkom popolu z vosku, ktorý sa pri vytavovaní modelov zo škrupín dokonale neodstránil. Ak sa nedá pomocou primárneho vtokového kanála odstrániť všetok vosk, je nutné pridať pomocný vtok alebo tiež výfuk, ktorý umožní odstránenie modelového vosku z dutiny. Ak nepomôžu ani takéto postupy je možné vytvoriť v stene formy pomocné výtokové otvory v nebezpečných miestach kde by vosk po vytavovaní ostával. Aby bolo možné pomocný otvor utvoriť bez poškodenia modelu je nutné na model nalepiť prídavný výstupok vhodného tvaru. Po vytavení vosku sa tieto otvory zatmelia. [6]

Všetky spôsoby odlievania, či už gravitačné, vákuové alebo odstredivé, kladú špecifické požiadavky na tvar keramickej škrupiny. Napríklad pri odlievaní samonosnej škrupiny musí

mať sústava dostačujúcu základňu kvôli stabilite. Pripojenie modelov na vtokový systém sa musí riešiť tak, aby sa zaistilo dobré vyplnenie dutiny formy tekutým kovom. [6]

Voľba spôsobu odlievania odliatkov zo stromčekov spolu s využitím kovu má veľký vplyv na celkovú ekonomiku presného odlievania pri navrhovaní stromčekov. V zlievarňach sa využíva ekonomicky štandardný systém, ktorý je vhodný pre zjednodušenú manipuláciu, dopravu a ďalšie zapracovanie, aj pri nie úplne ideálnom využití roztaveného kovu. [6]

## 2.3 Škrupiny

Charakteristickým znakom metódy vytaviteľných modelov je nedelená forma. Pre lepšiu predstavu je na obrázku 9 viditeľný stromček obalený primárnym obalom. Model potrebný k vyrobenej forme vždy zanikne, obvykle vytavením, preto je pre každú formu potrebný nový model. Formovacie hmoty majú kašovitú konzistenciu. Jadrá sa vytvárajú buď súčasne s formovaním, alebo sa hotové jadrá vkladajú do voskových modelov, najčastejšie už pri výrobe. Forma sa pred odlievaním zahrieva v drvivej väčšine prípadov. Nakoľko sú škrupinové formy zložené z vrstiev, majú omnoho horšiu tepelnú vodivosť, kov v nich teda tuhne dlhšiu dobu. To znamená, že v takýchto formách ide vyrobiť aj odliatky natoľko komplikované, že ich výroba pomocou pieskových foriem by bola nemožná. Pri metóde vytaviteľných modelov sa zaformuje celá odlievacia sústava, skladajúca sa z centrálného vtoku, pomocných vtokov a samotných modelov. Pracovník vyrábajúci obalové hmoty, nepotrebuje okrem zariadenia na kontrolu hustoty formovacej zmesi žiadne iné pomôcky. Proces je taktiež možné plne automatizovať, no pri zložitejších stromčekoch je vždy vhodný dozor skúseného pracovníka. [6] [18]



Obrázok 9 Stromček obalený primárnym obalom [18]

Keramickej povaha formy v procese presného odlievania je kľúčová a užíva sa vo veľkej škále typov výroby a ešte väčšom množstve druhov zmesí. Existujú ale charakteristiky výroby, ktoré vyžadujú špeciálnu pozornosť. Vosk má pomerne veľký koeficient tepelnej rozťažnosti, naproti čomu keramika má daný koeficient malý. Tieto rozdiely spôsobujú narušenie rovnováhy v procese, ktoré je potreba identifikovať a riešiť. [7]

Dôsledky rozdielnych tepelných rozťažností materiálov spôsobujú, že pri akomkoľvek ohreve vosku počas výroby škrupiny by mohla forma prasknúť a tým sa ničieť. Faktom je, že ak by sme sa pokúsili vytaviť vosk z formy pomalým ohrievaním, forma by praskla zakaždým, preto boli vyvinuté špeciálne postupy a opatrenia, ktoré budú priblížené neskôr.

Chladnutím kovu vo forme, existuje riziko pnutia formy spôsobeného stiahnutím kovu a to najmä v zložitejších geometriách. Tento efekt môže viesť ku roztrhnutiu či prasknutiu povlaku. Táto zložitá problematika rovnováhy medzi dostatočnou pevnosťou keramickej škrupiny pre bezpečnú manipuláciu a výdrž pri vytavovaní vosku, si priamo protirečí s požiadavkou na menšiu tvrdosť škrupiny v snahe minimalizovať nebezpečie prasknutia odliatku pri tuhnutí kovu a ľahším vybúraním odliatkov. [19]

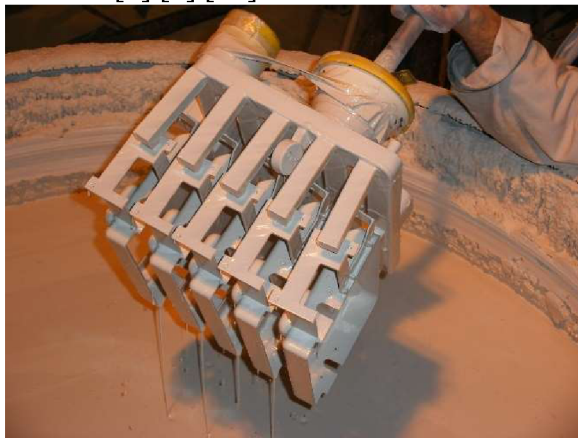
Najväčšími zaťažzeniami formy sú práve procesy vytavovania a samotného nalievania roztaveného kovu do voľne stojacej škrupiny. Praskliny pri liatí kovu sa najčastejšie vyskytujú v rohových regiónoch formy, skôr než v rovnejších plochých častiach. Tento jav je spôsobený najmä rozdielnou hrúbkou rohových častí oproti zbytku formy. Pre zisťovanie možností škrupín ako aj zabezpečenie bezpečného výrobného procesu sa rôzne štúdie zameriavajú na mechanické

vlastnosti materiálov použitých pri výrobe formy, ako aj pozornosť či experimentálne určenie sily potrebnej ku prerazeniu steny formy. [19]

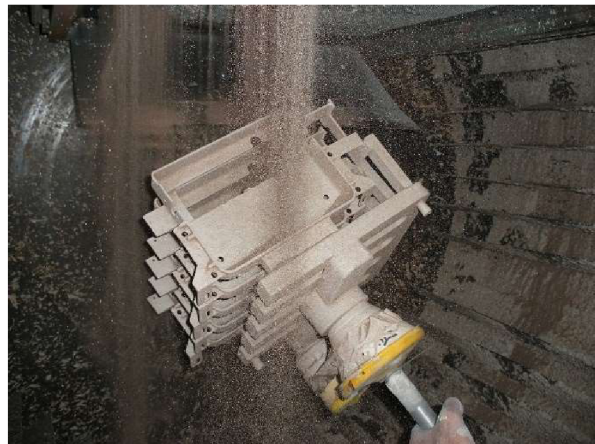
Ďalšou charakteristikou procesu je faktor zmrštenia. Kov sa pri vychladnutí nepatrne siahne, ako aj vosk po vstreknutí do formy. Finálna veľkosť odliatku preto nezodpovedá presne predlohe. Toto sa samozrejme vzťahuje aj na väčšie komponenty. Obecne platí čím väčší je model, tým väčšia je aj redukcia rozmerov, obťažnosť korigovania týchto výchyliiek. [7]

### 2.3.1 Obaľovanie

Obaľovanie je opakovaný proces namáčania modelových stromčekov do obalovacej hmoty (obrázok 10), zásyp úplnej vrstvy žiaruvzdorného materiálu s vhodnou zrnitosťou (obrázok 11) a sušenie jednotlivých obalov. Tento proces sa opakuje pokiaľ má obal dostatočnú hrúbku na ktorej záleží pevnosť škrupiny. Počet obalov býva od 3 do 10. Prípady použitia viacerých vrstiev sa vzťahujú na väčšie, objemnejšie modely potrebujuce ťažšiu a pevnejšiu formu pre správne odlíatie. [6] [7] [20]



Obrázok 11 Obaľovacia brečka [20]



Obrázok 10 Obaľovací zásyp [20]

Pred obaľovaním je nutné odstrániť z povrchu zostaveného voskového modelu zvyšky oddeľovacieho prípravku (separátora), inak prvý obal k povrchu voskových modelov dokonale nepriľne. Chybne nanosený obal potom pnutím popraská, odlupuje sa a je príčinou výrobných porúch. Táto úprava sa líši v závislosti na užitom oddeľovacom prípravku. Ak bol spomínaným separátorom olej, stromček sa umyje v benzíne a po osušení niekedy ešte v alkohole. Ak deliace prípravky obsahujú zmáčadlá, nemusí sa povrch voskových modelov nijak upravovať. [6]

Prvá, takzvaná primárna obalová vrstva aplikovaná na vosk bude vo finále v kontakte z roztaveným kovom preto sa jej zloženie líši od sekundárnych, doplnkových obalov. Tieto rozdiely sa vzťahujú jednak na typ keramiky ako aj na brečku a tekuté pojivo, ktoré po zatuhnutí zatmelí jednotlivé častice do súvislého cementu. [7]

Po vykonaní príslušných prípravných úkonov sa čistý stromček vytemperovanej teploty na rovnakú aká je na pracovisku, kde sa zamotané obaľovanie vykonáva, namočí do spomínanej primárnej obalovej kašovitej hmoty s predpísanou viskozitou. Namočí sa pomalým pohybom pri súčasnej rotácii stromčeku a nakláňaním sa doceli zatečenie obalovacej kaše do všetkých miest voskového stromčeka, pričom hmota zmáča stromček rovnomerne. Zároveň je nutné dbať na kontrolu problémových miest akými sú rohy či drážky, aby sa v týchto oblastiach nevytvorili vzduchové bublinky. Stromček zotrúva v obalovej hmote kým sa nevytvorí dostatočná hrúbka povlaku. Dĺžka ponorenia každého modelu je individuálna, ako aj doba po ktorú z modelu odkvapkáva prebytočná kaša pred ďalším cyklom. Po vybratí z obalovacej hmoty sa stromček zasype žiaruvzdornou drťou vhodnej zrnitosti. Pre primárne vrstvy sa používajú jemnejšie drte a pre sekundárne obaly zase drte s hrubšou zrnitosťou. Medzi každým obalom sa stromček samozrejme suší. [6]

Obalovanie je najdôležitejším úkonom pri výrobe keramických škrupín s kľúčovým vplyvom na kvalitu výsledného produktu. Preto je nutné venovať tomuto výrobnému procesu mimoriadnu pozornosť. Jedna z hlavných požiadaviek výrobcov keramických foriem sú konštantné vlastnosti obalovej hmoty. Práca s ňou má byť jednoduchá a jednotlivé obaly musia vysychať dostatočne rýchlo. [6]

### 2.3.2 Obalové hmoty

Príprava obalovej hmoty spočíva v pridaní potrebného množstva žiaruvzdornej múčky do kvapalinového pojidla. Pripravená suspenzia sa nechá určitú dobu odstáť, aby sa vyplavil zachytený vzduch, ktorý sa dostal do roztoku s múčkou, a aby sa povrch jednotlivých zrn múčky dokonale zmočil. [6]

Viskozita obalovej hmoty býva rôzna a riadi sa podľa zvyklostí v jednotlivých závodoch. V základe však drobné a zložité modely s hlbokými drážkami, úzkymi otvormi a komplikovanými dutinami vyžadujú redšie obalové hmoty než rozmernejšie a tvarovo nenáročnejšie modely. [6]

Pri samotnom procese výroby kaše existujú základné neopomenuteľné faktory. Prvoradé pre každý design kaše je vytvorenie „stabilnej kaše“ – tak aby dosahovala potrebných a predom stanovených parametrov. [21]

Na to, aby sa kaša považovala za stabilnú musí byť dobre premiešaná do bodu v ktorom je jej viskozita konštantná. Po vytvorení je často viskozita danej kaše veľmi vysoká a postupným pridávaním komponentov a úpravou sa stabilizuje. [21]

Pre správnu prípravu kaše existujú rôzne zariadenia. V najzákladnejšom rozdelení je možné špecifikovať bez zárezové a vysoko zárezové mixéri. Je nutné poznamenať, že tento aspekt výrazne ovplyvňuje dobu stabilizácie kaše pri výrobe. Bez zárezový mixér je špecifikovaný ako zariadenie na princípe rotujúceho bubna, kde sa pridávajú komponenty pre vytvorenie kaše. Následne je bubon uzatvorený a umiestnený na horizontálny rotujúci mechanizmus pre kontinuálne premiešavanie kaše. Tento spôsob zabraňuje akejkoľvek strate v dôsledku evaporácie materiálov, no bez akýchkoľvek zárezových lopatiek je doba premiešavania a stabilizácie rádovo v dňoch. Pre porovnanie vysoko zárezový mixér poskytuje veľkú mixačnú energiu a tým je schopný stabilizovať kašu rapídne. Tento čas dosahuje pri niektorých modeloch rádovo minúty. Rizikom používania týchto prístrojov je hromadenie tepla z mixačného procesu v samotnej kaši čo by mohlo mať za následok jej poškodenie. Ak sa tento spôsob miešania užíva, je nutné minimalizovať čas, ktorý kaša strávi v danom prístroji na minimum a zbytok miešania/udržiavania sa doporučuje v klasických nízko zárezových strojoch. [6]

Pri neustálom pokroku a vývoji nových technológií v oblasti obalových hmôt, či už za účelom lepších vlastností výslednej škrupiny, ceny alebo nezávadnosti používaných procesov a ich dopad na životné prostredie vznikajú mnohé pokrokové metódy:

- ✚ *Praktické zhodnotenie Zirkónu a jeho alternatívnej náhrady je veľmi aktuálna téma pri celosvetových stúpajúcich cenách tohto materiálu. Predovšetkým cena keramických škrupín stále narastá a tým núti zlievarne nad výskumom iných možností pre zníženie nákladov na výrobu. Zirkón poskytuje niektoré prednosti vďaka ktorým bol dlhodobo ideálnou voľbou pre výrobu foriem, ako malá tepelná expanzia, oblý tvar zrn, vysoká hustota. Pre efektívne nahradenie sú často používané materiály ako oxid hlinitý, kremík, no kombináciou všetkých či niektorých týchto materiálov sme schopní dostať formy s unikátnymi vlastnosťami. [22]*

- ✚ *Vláknami zosilnené formovacie kaše* je riešenie pre firmy ktorým dochádza miesto a nemajú priestor pre rozšírenie mechanizácie obalovania voskových stromčekov sekundárnymi posypmi. Užitie organických vlákien pridaných do obalovej kaše drasticky znižuje počet nutných sekundárnych obalov. Vlákna taktiež poskytujú podporný materiál v nebezpečných miestach škrupiny ako sú rohu či úzke špáry, ktoré takto dostávajú rovnomerný povlak. Vlákna ďalej pomáhajú predchádzať možnostiam prasknutia foriem a navyše vďaka používaniu organických materiálov, vyhoria tieto vlákna pri vypalovaní škrupiny, čím vzniknú vo forme mikroskopické kanáliky zvyšujúce permeabilitu. [23]
- ✚ *Zlepšovanie permeability odliatkov pomocou grafických častíc* pridaných do kremičitej obalovej kaše naprieč objemom je ďalšou metódou ako zlepšiť odliatky. Upravené formy boli následne vypálené, pričom grafitické častice zhoreli a vytvorili póry v škrupine. Testovanie ukázalo že permeabilita sa zvyšuje exponenciálne s narastajúcou koncentráciou pórov. Problémom pri užívaní tejto metódy však spočíva v oslabení samotnej škrupiny, preto je nutné pred začiatkom používania tohto procesu stanoviť minimálnu bezpečnú hranicu pevnosti formy a podľa toho použiť maximálny možný objem grafitických častíc. [24]

### 2.3.3 Spojivá

Keramické materiály využívané pre výrobu majú veľké možnosti, či už kremičitého piesku, hlinito kremičitých či iných materiálov. Voľba je založená na dostupnosti materiálov, cene a vhodnosťou pre danú výrobu. Kremík existuje v podobe jemného piesku ťaženého na rôznych miestach na zemeguli. Kvalita a jemnosť materiálu sú hlavné dôvody jeho užívania v primárnych obalových vrstvách. Piesok sa následne ďalej drví až pokým nevznikne jemný prach vhodný ako prímes do brečiek. [7]

Obyčajne vyrábanú užitím kremeňa, keramického materiálu ako takého, no pridaním buď vodnej či alkoholovej báze sú vytvorené základné druhy spojív:

- *Spojivá založené na báze alkoholu* nielenže schnú rýchlejšie ako spojivá založené na báze vody no dokážu byť aj vytvrdzované pomocou vystaveniu amoniakovej atmosfére. Tieto spojivá sa užívajú výhradne v sekundárnych obaloch, zvyčajne ak sa jedná o automatizované nanášanie týchto vrstiev. Pri stromčekoch obalovaných pomocou kaše so spojivom na báze alkoholu v kombinácii s amoniakovým vytvrdzovaním je možné nanášať jednotlivé vrstvy rádovo v rozpätí minút. Sekundárne obaly musia poskytnúť škrupine výslednú hrúbku a pevnosť, preto je časová úspora v tejto časti procesu veľmi výhodná. [7]
- *Spojivá založené na báze vody* sú zvyčajne vzduchom sušené po obalení. Systém je univerzálne využívaný pre primárne obalové vrstvy. Pomalšie tuhnutie na vode založených obalov, na rozdiel od kremičitých spojív založených na alkohole, je užitočnejšie v umožnení dostatočného manipulačného času pre zaistenie hladkého a rovnomerného pokrytia voskového stromčeka. Nová generácia na vode založených spojív sa snaží o obmedzenie užívania spojív na báze alkoholu kvôli dopadom na životné prostredie. Vyzerá to, že v budúcnosti nastane úplný zákaz, či aspoň veľké obmedzenie v užívaní prostrediu škodlivých spojív. Odpoveďou na tieto výzvy sú projekty zamerané na vývoj a výskum alternatívnych ekologicky nezávadných spojív ako napríklad spojivo EKOSIL. EKOSIL využíva prevratnú integráciu latexových prvkov čím spojivo získava nízke povrchové pnutie v základnom prevedení, čím zlepšuje rozprestieranie keramických materiálov a samotnú zmäčivosť na voskový povrch spolu so skrátením času sušenia jednotlivých vrstiev. Keramické kaše užívajúce spojivá EKOSIL taktiež získavajú dobrú flexibilitu garantujúcu dobré pokrytie stromčeka a veľmi kvalitný povrch výsledného odliatku pri minimálnych

sklonoch k defektom. Všetky tieto výhody sú zároveň doplnené nehorľavosťou a netoxicitou takýchto spojív. Mnohé zlievarne pochádzajú na podobné typy spojív či už z dôvodu nezávadnosti alebo lepšej manipulácie, nakoľko zamestnanci nepotrebujú bezpečnostné obleky spojené s manipuláciou s horľavým a nebezpečným materiálom. [7] [25]

### 2.3.4 Vytavovanie vosku a vypaľovanie škrupín

Po nanesení posledných obalov a dokonalom presušení škrupiny je potrebné vytaviť voskový stromček pre dokončenie samotného procesu výroby formy. Pre tento účel sa používa viacero rôznych druhov vytavovania:

- Vytavovanie za vysokej teploty (obrázok 12) spočíva vo vložení obalených stromčekov do pece vyhriatej na teplotu minimálne 750°C, pričom pracovná teplota sa pohybuje v rozpätí 900 až 1 100°C. Týmto úkonom sa spojí vytavovanie formy s jej vypálením. Straty vosku, ktorý vyteká z foriem obrátených naruby, do zbernej nádoby pod pecou sú 10 až 15%. Tepelným nárazom pri vložení do pece sa vosk tesne pri stene škrupiny rýchlo odtaví, čím vytvorí dilatačnú špáru nesmierne dôležitú pre úspešne vytavenie vosku bez prasknutia formy v dôsledku rozpínania modelu pri tavení. Vytavovanie aj vypaľovanie trvá zhruba 15 až 20 minút. Nevýhoda tejto metódy je časté strácanie vosku a nebezpečenstvo vytvorenia výbušnej atmosféry. [6] [26]
- 
- Obrázok 12 Vytavovanie vosku za vysokej teploty [26]
- Vytavovanie za nízkych teplôt spočíva v roztápaní modelu v hmote o rovnakom zložení ako je model zahriatej na dva krát vyššiu teplotu ako je teplota tavenia modelového vosku. Modely sa vytavia za 10 až 15 minút. Na túto metódu sa taktiež používa vytavovanie v kúpeli z nízkotavitelných zliatin či v horúcej vode. [6]
  - Vytavovanie dielektrickým ohrevom funguje na princípe umiestnenia vodou zvlhčenej škrupiny do poľa vysokofrekvenčných oscilácií. Vlhká škrupina sa rýchlo ohreje, vosk po tomto tepelnom šoku opäť vytvára dilatačnú špáru a model sa bezpečne rozpúšťa. [6]
  - Vytavovanie horkým vzduchom uskutočníme jeho privedením do stredu vtokového kolu voskového stromčeka, ktorý sa tak pretaví skôr ako sa ohreje celý model. Vzniká vlastne dutý voskový model vytavovaný zvnútra, čím sa opäť zabraňuje deštruktívnemu rozpínaniu vosku. [6]
  - Vytavovanie autoklávom je princíp založený na rozpustení vosku v sýtej vodnej pare v tlakovej nádobe (obrázky 13,14). Prednosťou tohto procesu je prudší tepelný ráz na povrch voskového modelu a tým pádom aj menšia pravdepodobnosť roztrhania formy. Pretože teplota závisí na tlaku, užíva sa v praxi zariadenie pracujúce od 0,3 až do 0,6 Mpa s teplotami od 135 do 165°C. Pri menších rozmeroch odliatkov si vystačíme aj s tlakom 0,05 Mpa. Pre bezproblémové vytavenie je najlepšie aby tlak



v nádobe stúpol na 0,3 Mpa za menej ako 1 minútu, toto časové obmedzenie je obzvlášť dôležité u autoklávov o väčších rozmerov. Doba vytavovania je 5 až 25 minút. Výhodou tohto spôsobu sú menšie straty vosku, menšie riziko popraskania škrupín, možnosť práce s tenkostennými škrupinami a lepšia kvalita povrchu odliatkov. [6] [27] [28]



Obrázok 13 Autokláv [27]



Obrázok 14 Uloženie škrupín v Autokláve [28]

Po vytavení vosku zo škrupín je nutné celú formu vypáliť. Vypaľovaním sa prevedie amorfná forma vrstvičky  $\text{SiO}_2$  na formu kryštalickú a odstránia sa všetky zbytky vosku. Vypaľovacia teplota býva vyššia ako  $800^\circ\text{C}$  ( $900$  až  $1080^\circ\text{C}$ ). Škrupiny z materiálov s nízkym koeficientom rozťažnosti, akými sú zirkón či tavený kremeň znášajú tepelné rázy a môžu sa preto vkladať do pecí vyhriatych na vyššiu teplotu. Naproti tomu škrupiny z kremennej múčky a piesku vyžadujú pomalší rovnomerný ohrev a opatrné ohrievanie v oblasti prvej kryštalografickej premeny. Vysoký koeficient tepelnej rozťažnosti kremeňa vyvolá väčšie rozťahnutie vonkajšej vrstvy, ktoré sa prudkým ohrevom zohriali na vyššiu teplotu ako vrstvy vnútorné. Je preto nutné pomalší ohrev a až na teplotu okolo  $575^\circ$ , kde dochádza ku objemovým zmenám, tam je nutné zotrvať na teplote približne 30 minút. Zbytok vypaľovania sa inak nelíši. Pre škrupiny vyrábané z odlišných materiálov je samozrejme nutné prispôbiť výrobný proces ich vlastnostiam a požiadavkám. [6]

### 3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Súčiastka pre experimentálny pokus bola zvolená na základe komplexnosti tvaru, rozmerov (17x16x17mm) a ďalších parametrov, akými sú aj využitie či možnosť zrovnania výroby daného dielu viacerými druhmi realizácie. Porovnávacie parametre boli volené v rámci celkového zmyslu danej malo kusovej výroby a ktoré boli predovšetkým dizajnové prevedenie a výsledná vizuálna podoba odliatkov pre ich využitie v oblasti dekoratívnych účelov.

Ďalšími parametrami sledovanými pri jednotlivých procesoch bola cena výroby, ako aj celková doba ktorú daný proces zaberie. Výsledná cena zahŕňa výhradne materiál používaný pri vytváraní foriem, spotrebovaný na túto činnosť ako aj jednotlivé materiály potrebné v konkrétnych metódach, ako napríklad vosk či jednotlivé zliatiny z ktorých bola súčiastka vo finále odlievaná. Taktiež bude zohľadnená cena výroby škrupiny pre technológiu vytaviteľného modelu zahrňujúca nalepenie dodaných voskových modelov na vtokový stromček a celkové obalenie. Ceny budú porovnávané ako jeden z rozhodujúcich faktorov experimentu.

Detailné prevedenie a malý rozmer súčiastky predstavujú najväčšiu výzvu všetkých zvolených druhov výroby (vid kapitolu 1). Na obrázkoch 15, 16 a 17 je možné pozorovať prevedenie dielcu a jeho vnútorné delenie. Pohľadovú časť modelu tvorí predná strana s dutým znázornením priezoru, ako je možné pozorovať na obrázku 17, preto bude práve na ňu kladený dôraz pri vyhodnocovaní jednotlivých odliatkov, ako aj čiastočné zanedbanie kazov v častiach nepohľadových. Ako je možné vidieť na obrázku 16, vyrábaný diel je dutý, čo v kombinácii s vybraním v prednej časti masky vytvára dutinu naprieč celým objemom vyrábanej súčiastky. [29]



Obrázok 15 Model helmy [29]



Obrázok 16 Model helmy detail na zadnú časť [29]



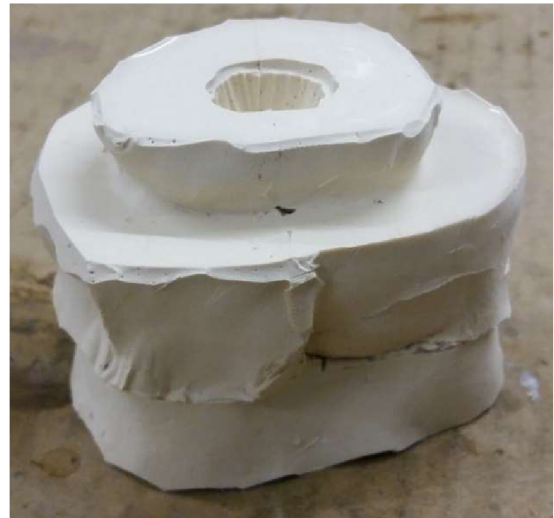
Obrázok 17 Model helmy, detail na prednú časť [29]

### 3.1 Lukoprénová forma

Ako východzí materiál pre zhotovenie formy na výrobu voskových modelov bol zvolený kaučuk Lukoprén N 1522<sup>®</sup> vyrábaný firmou Lučební závody Kolín. Toto riešenie bolo zvolené v neprospech pôvodne zamýšľaných silikónových materiálov, pôvodne určených na zhotovenie formy. Po overení možností oboch materiálov sa ukázala výhoda použitia Lukoprénu v rámci možnosti odliatia prvej série výrobkov z cín-olovnatej spájky priamo do tejto formy vďaka tepelnej odolnosti až do +250°C daného kaučuku. Táto vlastnosť ako aj pevnosť daného materiálu boli jednoznačnými výhodami pre pokus hneď vo viacerých smeroch, jednak umožňovali výrobu voskových odliatkov o vysokej kvalite a možnosť zhotovenia cín-olovnatej série odliatkov, no poskytla taktiež vyhotovenie série modelov z dvojzložkovej živice.

Pre pomerne náročný model zvolený ako experimentálna vzorka bolo prevedenie formy upravené na tri samostatné časti spolu tvoriace celok formy s dvoja jadrami, ako môžeme pozorovať na obrázkoch 18 a 19. Charakter materiálu znemožňuje použitie klasického prevedenia vkladaných jadier, nakoľko kaučuková zmes má príliš veľkú elasticitu pre správne uchytienie jadra. Následkom týchto faktorov boli jadrá pridané ako súčasť samotných častí formy. Toto riešenie je najlepšie demonštrované na obrázku 19 kde je možné pozorovať hrubé centrálné jadro vytvárajúce hlavnú dutinu odliatku, ako aj menšie jadro v prednej časti formy zodpovedné za priezorovú dutinu v pohľadovej časti dielca.

Model bol v prvej fáze zmodelovaný plastickou hmotou takým spôsobom, aby zo súčiastky vyčnievala iba predná polovica. Následne bol okolo celého segmentu vztýčený ochranný val do ktorého sa vpravil tekutý Lukoprén N 1522. Postu sa následne opakoval ešte dva krát, pričom boli steny zaschnutých a zvulkanizovaných častí formy ošetrené Parafínovým separátorom, aby bola zachovaná rozobrateľnosť formy. Zároveň boli v kľúčových miestach formy vytvorené zámky pre správne zloženie a doliehanie jednotlivých segmentov. Vulkanizácia a tuhnutie každej časti trvalo 12 hodín. Forma bola po dokončení opatrená vyvýšeným vtokovým kanálikom pre lepšiu metalostatický tlak pri odliavaní cín-olovnatých odliatkov.



Obrázok 18 Lukoprénová forma zostavená



Obrázok 19 Lukoprénová forma rozložená

### 3.2 Séria odliatkov z cín-olovnatej spájky

Pre zhotovenie prvej série bola zvolená eutektická cín-olovnatá spájka. Rozhodnutie použiť tento materiál bolo založené na teplote tavenia umožňujúcej zhotovovať odliatky priamo pomocou Lukoprénovej formy.

Formu bolo nutné pred použitím pre tento proces upraviť k docieleniu čo najlepších výsledkov a presnosti odlievajúcich modelov. Základná úprava spočíva v rovnomernom zásype povrchu formy drveným uhlíkom v mieste, kde bude kaučuk v kontakte s roztaveným kovom. Tento proces na jednej strane zvyšuje tepelnú odolnosť kaučuku pri nárazovom zahriatí a zároveň zabraňuje zbytkom Parafinového separátora vo vyparovaní. Bez tohto ošetrenia dochádza pri kontakte separátora s kovom ku vypareniu, čím v odliatku zanechá viditeľné bubliny na povrchu súčiastky a tým jej znehodnotí povrch. Posledným krokom pred prvým odlievaním je zhotovenie odvzdušňovacích kanálikov na problematických miestach formy. Umiestnenie týchto prvkov musí umožniť roztavenému kovu zatiecť na všetky miesta, kde by sa udržala bublina vzduchu, zväčša sa jedná o ostré rohy, tenkostenné štruktúry či prvky pod negatívnych úkosom vzhľadom ku vtokovej sústave. Je nutné poznamenať že formy vyrobené z kaučuku sú schopné odlievať takéto zložité tvary vďaka svojej elasticite no nutnosť správneho umiestnenia a prevedenia odvzdušňovacích prvkov je kľúčová pre ich samotné prevedenie. Forma bola opatrená počiatočnými šiestimi odvzdušňovacími prvkami.

Následne sa jednotlivé časti zložila a spevnia šnúrami alebo sťahovacími páskami. Do pripravenej formy je privedená roztavená cín-olovnatá spájka. Po zatvrdnutí (2-5 min.) sa forma rozoberie a nasleduje vyhodnotenie prvého odliatku. Tento pokus končí takmer vždy neúplným zatečením a teda defektným výrobkom, ktorý funguje predovšetkým ako indikátor miest formy kde je potrebné zhotoviť ďalšie odvzdušňovacie kanáliky. Vo všeobecnosti je prvým správne vyrobeným kusom rádovo tretí až štvrtý odliatok. Tento počet sa mení v závislosti na skúsenostiach a schopnostiach autora formy. Forma bola po dvoch testovacích odliatkoch vybavená dodatočnými odvzdušňovacími kanálikmi (celkovo 12) následne umožňujúcimi výrobu dostatočne kvalitných odliatkov.

Na obrázkoch 20 a 21 je uvedená helma z prvej série poradové číslo 4 zbavená vtokovej sústavy. Je možné všimnúť si kvalitné prevedenia detailov v prednej pohľadovej časti masky, no na viacerých miestach sú viditeľné kazy spôsobené spomínaným vyparovaním separačného prípravku. Celá séria je zobrazená v prílohe 1.



Obrázok 20 Cín-Olovnatá helma



Obrázok 21 Cín-Olovnatá helma, dokončovacia úprava

Stiahnutie kovu pri tuhnutí taktiež zapríčinili nevyhovujúce uloženie s vôľou pri spájaní dielca s proti kusom, čo bolo odstránené úpravou formy viditeľnou na obrázku 22. Zrezanie hlavného jadra pridalo na kritickú oblasť materiál, vďaka ktorému bolo umožnené pri odliatku previesť dokončovaciú úpravu vrtaním diery na presný rozmer  $\text{Ø } 4,2\text{mm}$ . Túto dokončovaciú úpravu je možné pozorovať na obrázku 20 .



Obrázok 22 Úprava lukoprénovej formy

### 3.3 Bronz a Hliník

Pre realizáciu odliatkov súčiastky z bronzu a hliníku pomocou metódy vytaviteľného modelu bolo nutné zhotoviť voskové odliatky heliem pre ďalšie spracovanie v procese. Výroba voskových heliem prebiehala pomocou Lukoprénovej formy využívanej taktiež pri zhotovovaní sérií produktov z cín-olovnatej spájky a dvojzložkovej živice. Na forme nebolo nutné uskutočňovať žiadne dodatočné úpravy, viskozita roztaveného vosku avšak spôsobovala nedokonalá zatekanie skrz vtokovú súpravu užívanú v ostatných metódach. Postup výroby bol preto pozmenený s cieľom zhotoviť voskové modely bez nutnosti výroby samostatnej formy. Výsledným riešením pre túto problematiku bolo zmontovanie vrchných dvoch kusov formy ako je možné pozorovať na obrázku 19 ktoré boli následne umiestnené naruby. Do jamky negatívu odlievanej súčiastky sa následne vpravil roztavený vosk. Ďalším krokom bolo vlisovanie pôvodného spodného dielcu formy (taktiež znázorneného na obrázku 19) do roztaveného vosku čím sa tlakom vyformoval požadovaný tvar a prebytočný vosk bol vytlačený odzdušňovacou súpravou mimo formu. Posledným krokom výroby sa následne celá spojená forma otočila a malé množstvo roztaveného vosku bolo naliate do pôvodného vtokového kanáliku pre využitie pri spájaní voskových heliem so stromčekom. Finálne voskové odliatky boli následne začistené a pripravené na export ako je možné pozorovať na obrázku 23.



Obrázok 23 Vosková helma

Celkový počet voskových heliem pre sériu odliatkov z bronzu a hliníku bol 24 kusov. Tie boli prevezené do firmy Moravia tech, a.s. ktorá zabezpečovala lepenie modelov na stromčekové súpravy, viditeľné na obrázku 24-A, a ich následné obalovanie do keramických škrupín. Pre lepšiu demonštráciu je možné vidieť na obrázku 24-B primárnu obalovacíu vrstvu pozostávajúcu z jemnejšej obalovej hmoty. Takto pokrytý stromček bol v ďalšom postupe obalený vrstvami hrubozrnnějších posypových vrstiev vytvárajúcich finálnu keramickú škrupinu viditeľnú na obrázku 24-C, spolu s vytavením vosku zo škrupiny.

Škrupiny boli pred odlievaním vypaľované na 400°C po dobu 1 hodiny pre zbaavenie sa zbytkového vosku zachyteného v ťažko dostupných miestach formy. Pred započatím procesu odlievania sa formy nahriali na teplotu 500 °C v priebehu 3 hodín, v ďalšom kroku bola teplota zdvihnutá na 750 °C, na ktorej škrupiny zotrvali po dobu 2 hodín pre bezpečnú kryštalickú premenu kremičitej zmesi na tejto teplote a ustálenia štruktúry foriem. Posledným stupňom sa škrupiny zahriali na teplotu 980 °C, čím bola dosiahnutá teplota pre odlievane, ako je zobrazené na obrázku 25. Formy sa po vyňatí z pece umiestnili do predpripravených rámových ohrádok, v ktorých boli následne zasypané. Zásyp formy zabraňoval roztavenému kovu vytiecť z formy v prípade prasknutia jednej z modelových častí, pomáhal udržiavať teplotu škrupinu kým je pripravený a dopravený kelímok s roztaveným kovom a taktiež stabilizuje škrupinu pri samotnom odlievaní. Zasypaná škrupina s bronzom je zobrazená na obrázku 26. Hliník bol odlievajú pri teplote 740 °C, pričom bronz bol nahrievaný a odlievajú na teplote 1200 °C. [30]

Po zatuhnutí oboch materiálov boli formy pripravené na odstránenie karmickej škrupiny. Pri čistení formy s hliníkom sa nevyskytli žiadne väčšie komplikácie, hrubý sekundárny obal bol obitý zo stromčekovej sústavy, pričom sa čiastočne očistili aj samotné odliatky. Medzi krok v tomto procese je možné pozorovať na fotodokumentácii v prílohe 2. Po odstránení celého zásypu zo stromčeku boli následne odrezané samotné odliatky spôsobom zaručujúcim dodatočný materiál v oblasti vtoku pre začistenie helmy v dokončovacích úpravách. Nasledujúcim krokom bolo očistenie dutín jednotlivých heliem od primárneho posypu, vytvárajúceho v daných miestach jadrá. Modely boli umiestnené do ultrazvukovej čističky po dobu 15 minút. Keramická hmota vyplňajúca dutiny sa postupom zmäkčila a narušila. Jadrá boli následne vyvrtávané užitím 4 mm vrtáku, 6 mm vrtáku a následne boli diery zväčšené až na priemer 8mm. Do jadra v prednej časti masky boli taktiež vyvrtané dva otvory v miestach najväčšieho objemu keramickej obalovej hmoty s veľkosťou 1mm s účelom narušiť celistvosť keramickej vrstvy. Helmy boli opäť umiestnené do ultrazvukovej práčky po dobu 20 minút. Po ukončení tohto procesu bol zostatkový keramický materiál odstránený z dutín odliatkov užitím nožu s malým profilom. Séria dvanástich hliníkových heliem bola ďalej opracovávaná dokončovacími úpravami ako zabrusovanie vtokového kanálu, začisťovanie hrán heliem



Obrázok 24 Stupne zasypania stromčekov [30]



Obrázok 26 Zahrievanie škrupín



Obrázok 25 Zasypaná škrupina s Bronzom

a následne prevrtavania 3,7mm diery v hornej časti dutinu odliatu pre možnosť kompatibilného spojenia s proti kusom a samotnej inštalácie. Tento postup sa zhoduje s dokončovacími úpravami uskutočnenými na sérii z Čín olovnatej spájky. Príklad výsledného produktu je možné pozorovať na obrázku 27. Jednotlivé fotky celej série sú priložené v prílohe 3, na niektorých fotkách tejto série je možné pozorovať menšie nedokonalosti v oblasti prednej časti odliatku. Defekty zapríčinené výskytom pretrvávajúcich bublín vzduchu pri odlievaní boli vyradené ako nedostatočné. Koncový počet hliníkových odliatkov preto klesol na 7 kusov.

Pri rozbíjaní škrupiny s Bronzom bolo zistené nedostatočné zatečenie užitej zliatiny CuSn6 ktoré týmto spôsobom znehodnotilo celú várku odliatkov. Na obrázku 28 si môžeme všimnúť vtokovú sústavu očistenú od keramického obalu. Z fotky je zrejma neschopnosť materiálu zatiecť do úzkych priestorov odliatkov v tenkostenných oblastiach napriek dostatočným prípravám i teplotám ako formy, tak aj zliatiny pri samotnom odlievaní. Celá séria dvanástich heliem je zobrazená v prílohe 4. Pre tento dôvod boli všetky odliatky z Bronzovej série označené ako vadné výrobky a pre porovnanie budú preto zohľadňované okrajovo iba v niektorých kategóriách.



Obrázok 28 Finálna podoba Hliníkovej helmy



Obrázok 27 Bronzová helma – vadný odliatok

### 3.4 Dvojzložková živica

Použitím lukoprénovej formy užívanej v ostatných postupoch je možné taktiež zhotoviť odlievanú súčiastku pomocou dvojzložkovej živice (obrázok 29). Zhotovenie odliatku z tohoto druhu materiálu bolo zaradené do experimentálnej časti, ako predvedenie možností využitia lukoprénovej formy. Diel získaný týmto spôsobom bude porovnávaný a vyhodnotený pomocou rovnakých kritérií ako ostatné testované materiály. Pre realizáciu bola zvolená dvojzložková živica Ebalta SG 2000 nadobúdajúca farbu slonovinej kosti po vytvrdnutí. Hmota má odlievací rádius približne 2,5 až 3,5 minúty do úplného zatuhnutia.

Pre samotné olievanie bol zvolený postup takmer totožný s procesom používaným pre zhotovovanie voskových odliatkov pri príprave stromčekov na odlievanie metódou presného odlievania.

Dve horné časti formy boli pevne spojené a prevrátané naruby s rozdielom zaslepenia vtokového kanálku plastickou hmotou, nakoľko nebol v tomto prípade používaný vôbec. Zmiešaním zložky A so zložkou B Ebalta v pomere 50/50 bol pripravený roztok živice. Následne bola hmota vpravená do formy tak, aby zaplnila celý objem vzniknutej dutiny v zložených



Obrázok 29 Finálny odliatok z dvojzložkovej živice

častiach formy. Posledným krokom bolo jemné vloženie finálnej časti formy na svoje miesto. Pri tomto bode bolo nutné dbať na bezpečnosť manipulácie nakoľko z formy unikala prebytočná živica, tento prebytok hmoty bol avšak nutný pre vyplnenie všetkých dutín nasádzanej finálnej časti formy. Po úplnej vulkanizácii Ebalty, (5-8min) bola forma rozobraná a výsledný odliatok očistený od prebytočného materiálu. Pri izbovej teplote je zatekavosť Ebalty SG 2000 dostačujúca, no problematickými sa ukazujú malé, detailné priestory kde napriek dobrej zatekavosti zostávajú malé bublinky vzduchu, ktoré nevyplávajú cez pomerne hustý roztok živice.

Výsledný produkt sa veľmi približuje originálnemu modelu. Jediným problémom tejto technológie je pomerne veľká spotreba materiálu. Pre výrobu jednej helmy je nutné namiešať 6ml roztoku a akákoľvek vada na výslednom produkte znamená stratu celého odliatku bez možnosti recyklácie na rozdiel od ostatných technológií ako je možné pozorovať v prílohe 5.

### 3.5 Zhodnotenie

Cenu každej helmy v prvom rade ovplyvňuje Lukoprénová forma kde 1 kg Lukoprénu stojí 22 €. Pre výrobu formy bolo spotrebovaných 100 g, doba výroby formy bola 3 dni. Ceny jednotlivých materiálov: Cín-olovnatá spájka vychádza na 9,5€/kg, cena bronzu je rádovo 6€/kg (pre stanovenie ceny série bola zvolená predpokladaná váha odliatku 3 g), cena Ebalty SG 2000 je 10€/kg a hliník použitý pri experimente stojí €/kg. Cenu bronzovej a hliníkovej série ovplyvňuje taktiež cena škrupiny: 28€ za kus, pričom doba výroby jednej škrupiny vo firme Moravia tech, a.s. boli 4 pracovné dni. Samotná príprava a odliatie bronzovej a hliníkovej série zabrali 1 pracovný deň.

Je nutné poznamenať že do celkovej ceny sa nezarátava cena času odpracovaného pri príprave lukoprénovej formy ani cena času odlievania samotných sérií. Pre stanovenie finálneho času uvažujeme dobu od začiatku výroby Lukoprénovej formy po odliatie samotných odliatkov a vykonanie dokončovacích úprav. Pre prehľadné zhodnotenie výsledkov experimentu bola vyhotovená tabuľka 4.

Tab. 4 Prehľad parametrov jednotlivých sérií

Séria	Materiál	Váha	Čas	Cena
Referenčná vzorka	ABS plast	1,03 g	-	2-4 €
Cín-olovnatá spájka	Sn60Pb40	9,74 g	3,5 dňa	3,1 €
Hliníková séria	AlSi8Cu3	2,88 g	8 dní	4,7 €
Bronzová séria	CuSn6	-	8 dní	4,8 €
Dvojzložková živica	Ebalta SG 2000	1,08 g	3,5 dňa	2,3 €

Pre celkovú vizualizáciu sú na obrázku 30 zobrazené všetky 3 finálne výrobky spolu s voskovým modelom a referenčným vzorkom.



Obrázok 30 Finálne odliatky zľava: Hliník, Vosk, Cín-Olovnatá spájka a Ebalta SG 2000 v porovnaní s referenčnou helmou vpravo



## 4 ZÁVERY

Technológia vytaviteľného modelu je v dnešnej dobe bežne užívanou výrobnou metódou v množstve priemyselných odvetví. Uplatnenie nachádza najmä v oblastiach s nutnosťou produkcie vysoko kvalitných odliatkov s minimálnou potrebou dokončovacích úprav. V dnešnej dobe sa výskum v oblasti vytaviteľných modelov zameriava na možnosti produkcie voskových modelov užitím 3D tlačiarň a zlepšovanie vlastností keramických foriem pre ešte spoľahlivejšie a kvalitnejšie odliatky.

Pri praktickom testovaní metódy na zvolenom odliatku boli zhotovené celkom dve série, následne zrovnávané s referenčnou vzorkou, ako aj s ďalšími dvoma druhmi odliatkov zhotovenými odlišnými spôsobmi výroby. Série vyhotovená technológiou vytaviteľného modelu používajúca hliník AlSi8Cu3 sa ukázala ako veľmi presná séria s pomerne malými kazmi a dobrými vlastnosťami ako bola hmotnosť či samotný povrch odliatkov. Na druhej strane séria z bronzu CuSn6 nebola schopná zabehnúť do škrupiny napriek dobrej príprave formy aj kovu. Tento neúspech bol spôsobený samotným zložením bronzu nakoľko pre tenkostenné odliatky sú výrazne vhodnejšie Bronzy CuSn10. Pre nedostatočný výsledok bol pokus hodnotený iba referenčne a vyhotovené odliatky nebudú mať ďalšie praktické využitie. Prvou sériu vyrobenou inou technológiou ako presným odlievaním sú odliatky z cín-olovnatej spájky. Uvedený materiál je jednoduchý na tavbu a odlievanie s výhodou v možnosti použitia aj pomerne málo odolnej Lukoprénovej formy pre realizáciu. Medzi nevýhody je nutné spomenúť fakt, že ide o pomerne nebezpečný kov, nakoľko obsahuje olovo, ako aj váhu a drobné vady na povrchu finálnych odliatkov. Posledná séria vyhotovená z Ebalty bola pridaná pre demonštráciu možnosti formy s priaznivo pozitívnym výsledkom. Odliatky zhotovené z tohto materiálu sa približujú originálnemu modelu vzhľadom aj váhou, no predstavujú skôr ukážku schopností, nakoľko nie je plán pre ich praktické využitie v modelovej dekorácii.

## POUŽITÉ ZDROJE [31]

- [1] Investment / Lost wax. *MAYCAST-NOKES: PRECISION ENGINEERING LTD* [online]. Halstead: Maycast-Nokes Precision Engineering Ltd, b.r. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.maycast.co.uk/our-services/investment-lost-wax>
- [2] LOST WAX CASTING 3. *RAPITYPES* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.rapitypes.com/rapid-metal-casting/lost-wax-casting-3/>
- [3] Investment Die Casting. *MES, Inc.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.mesinc.net/investment-casting/>
- [4] Lukopren N 1522: Dvousložkový silikonový kaučuk. *Lučební závody Kolín* [online]. Kolín: Lučební závody a.s. Kolín, b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.lucebni.cz/cs/lukopren-n/39-silikonovy-kaucuk-lukopren-n-1522.html>
- [5] SG 2000 / Komp. A + B. *Ebalta* [online]. Kotvrdovice: KTK Blansko, spol s r.o., b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.ebalta.cz/cz/katalog-produktu/rychleschnouci-lici-pryskyrice/pryskyrice-neobsahujici-plniva/sg-2000-komp-a%C2%A0-b>
- [6] DOŠKÁŘ, Josef, Jan GABRIEL, Miroslav HOUŠŤ a Miroslav PAVELKA. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976, 315 s. DT 621.746.
- [7] BEELEY, Peter a Robert SMART. *Investment Casting*. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 0-901716-66-9.
- [8] KOSOUR, Vojtěch, Milan HORÁČEK a Jiří HORENSKÝ. Kvalitní voskový model: základní předpoklad kvalitního odlitku zhotoveného metodou vytavitelného modelu. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2012, **60**(9-10), 329-331.
- [9] HORÁČEK, Milan. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. *Slévárenství*. Brno, 2001, **49**(10), 570-581.
- [10] Investment tooling / fixtures. *MAYCAST-NOKES: PRECISION ENGINEERING LTD* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.maycast.co.uk/our-services/investment-tooling-fixtures>
- [11] INTRODUCTION: INVESTMENT CASTING WAX PATTERN CLEANERS. *FOUNDRY GENERAL* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://foundrychem.com/investment-casting/>
- [12] CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s. : il. ISBN 0-7506-4790-6.
- [13] How to Make Silver Jewelry from 3D Printed Molds. *ZMorph Blog* [online]. Wrocław (Poland): ZMorph S.A., b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://blog.zmorph3d.com/silver-jewelry-3d-printed-molds/>

- [14] TALANDA, Ivan, Milan HORÁČEK a Jan JEDOVNICKÝ. Moderní voskové směsi a výběr jejich nejvhodnějších kombinací pro slévárnu Fimes, a. s. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2012, **60**(9-10), 332-336.
- [15] TYPES OF WAX USED IN INVESTMENT CASTING. *SaffroShine* [online]. Solapur (India): SaffroShine Organics Pvt. Ltd., b.r. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.saffroshine.com/types-wax-used-investment-casting/>
- [16] Lot 43: Cleveland (2010) Tool & Machine Inc Model CTM-WI-CF-ST-DT-25 Hydraulic Wax Injection Press. *GE Warehouse* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://gewarehouse.com/auction-030/itemDetails/2669/288360>
- [17] Understanding Investment Casting - Process Basics. *IMAGINATION IN METALLURGY* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.hitchiner.com/process-basics>
- [18] Bharat Dyes Agency. *Just Dial* [online]. Malad (Mumbai): Just Dial Limited, b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [https://www.justdial.com/Rajkot/Bharat-Dyes-Agency-Near-Jalaram-Petrol-Pump-Kalawad-Road/0281P2825-2825-110130123551-X8Y7\\_BZDET/photos](https://www.justdial.com/Rajkot/Bharat-Dyes-Agency-Near-Jalaram-Petrol-Pump-Kalawad-Road/0281P2825-2825-110130123551-X8Y7_BZDET/photos)
- [19] EVERHART, W., S. LEKAKH, V. RICHARDS, J. CHEN, H. LI a K. CHANDRASHEKHARA. Corner Strength of Investment Casting Shells. *International Journal of Metalcasting*. Cham: Springer International Publishing, 2013, **7**(1), 21-27. DOI: 10.1007/BF03355541. ISSN 1939-5981.
- [20] THE INVESTMENT CASTING PROCESS. *PI-CASTINGS* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://pi-castings.co.uk/investment-casting/investment-casting-process/#step3>
- [21] BIJVOET, Mark. PREPARATION AND CONTROL of shell slurry. *Foundry Trade Journal*. 2001, **175**(3583), 26-28.
- [22] BRANSCOMB, Tom. A Practical Evaluation of Zircon Replacement Alternatives. *Incast: International magazine of the investment casting institute* [online]. 2011, **2011**(11), 29-31 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://content.yudu.com/libraryHtml/A42tlx/INCASTNovember2011/reader.html>
- [23] BUNTOCK, Kermit. Should You be Using Fiber in Your Slurries ?. *Incast: International magazine of the investment casting institute* [online]. 2011, **2011**(4), 14-15 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://content.yudu.com/libraryHtml/A42tlp/INCASTApril2011/reader.html?refUrl=https%253A%252F%252Fwww.investmentcasting.org%252F>
- [24] KLINE, D.M., S.N. LEKAKH a V.L. RICHARDS. Improving Investment Casting Mold Permeability Using Graphite Particles. *Transactions AFS*. 2010, **118**, 159-165.
- [25] KARWINSKI, A. WATER BASED BINDERS - a new generation. *Foundry Trade Journal*. 2000, **174**(3566), 22.

- [26] FLASHFIRE DEWAX SYSTEM. *Texas Precision Metalcraft* [online]. Sugar Land (Texas): txpm.com, b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbdm/adm/https://txpm.com/assets/pdf/171024\_TXPM\_Case-Study\_Flashfire\_Dewax.pdf
- [27] Autoclave for Dewaxing. *G.S.Machineries* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [https://gsmachineries.com/products/special\\_purpose\\_machine/autoclave](https://gsmachineries.com/products/special_purpose_machine/autoclave)
- [28] Investment Casting Process. *Metal Goods* [online]. Brescia (Italy): Metal Goods Srl, b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.metalgoods.it/en/casting-process.html>
- [29] LEGO GROUP. *LEGO Digital Designer*. 2004. [prístup 2004]. Dostupné z: <https://www.lego.com/en-us/ldd>. [Požiadavky na systém: operačný systém: Microsoft Windows XP, Vista, 7, 8, 10, procesor: 1 GHz, grafická karta: 128 MB, pamäť RAM: 1 GB - miesto na pevnom disku: 1 GB].
- [30] ČUNDA, Petr. *FOTO*. [e-mailová komunikace]. 20.2.2019 11:35, b.r. [1.5.2019] Moravia Tech, a.s.
- [31] *CITACE PRO* [online]. b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

## ZOZNAM OBRÁZKOV:

Obrázok 1 Ukážky voskových modelov a finálnych produktov vyrobených technológiu presného odlievania [1] [2] [3].....	9
Obrázok 2 Závislosť presnosti na aspektoch odliatku [7].....	11
Obrázok 3 Ukážky foriem pre výrobu voskových modelov [10].....	12
Obrázok 4 Forma pre výrobu voskových modelov [11].....	13
Obrázok 5 Príklad silikónovej formy [13].....	14
Obrázok 6 Vosk vo forme granúl [15].....	15
Obrázok 7 Vstrekolis vosku [16].....	17
Obrázok 8 Príklad zostaveného stromčekového systému [17].....	19
Obrázok 9 Stromček obalený primárnym obalom [18].....	20
Obrázok 10 Obalovací zásyp [20].....	21
Obrázok 11 Obalovacia brečka [20].....	21
Obrázok 12 Vytavovanie vosku za vysokej teploty [26].....	24
Obrázok 13 Autokláv [27].....	25
Obrázok 14 Uloženie škrupín v Autokláve [28].....	25
Obrázok 15 Model helmy [29].....	26
Obrázok 16 Model helmu detail na zadnú časť [29].....	26
Obrázok 17 Model helmy, detail na prednú časť [29].....	26
Obrázok 18 Lukoprénová forma zostavená.....	27
Obrázok 19 Lukoprénová forma rozložená.....	27
Obrázok 20 Cín-Olovnatá helma.....	28
Obrázok 21 Cín-Olovnatá helma, dokončovacia úprava.....	28
Obrázok 22 Úprava lukoprénovej formy.....	29
Obrázok 23 Vosková helma.....	29
Obrázok 24 Stupne zásypu stromčekov [29].....	30
Obrázok 25 Zahrievanie škrupín.....	30
Obrázok 26 Zasypaná škrupina s Bronzom.....	30
Obrázok 27 Finálna podoba Hliníkovej helmy.....	31
Obrázok 28 Bronzová helma – vadný odliatok.....	31
Obrázok 29 Finálny odliatok z dvojzložkovej živice.....	31
Obrázok 30 Finálne odliatky zľava: Hliník, Vosk, Cín-Olovnatá spájka a Ebalta SG 2000 v porovnaní s referenčnou helmou vpravo.....	32

## ZOZNAM TABULIEK:

Tab. 1 Prehľad metód odlievania a dosiahnuteľných rozmerových presností. [6].....	11
Tab. 2 Technické možnosti foriem používaných na výrobu voskových modelov. [6].....	15
Tab. 3 Kľúčové body ovplyvňujúce chovanie vosku. [6] [7].....	16
Tab. 4 Prehľad parametrov jednotlivých sérií.....	32

## ZOZNAM PRÍLOH:

Príloha 1 Kompletná séria z cín-olovnatej spájky
Príloha 2 Proces obijania hliníkového stromčeku
Príloha 3 Kompletná séria odliatkov z hliníku
Príloha 4 Séria bronzových odliatkov na stromčeku
Príloha 5 Vadný odliatok z dvojzložkovej živice

