



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU V SOUČASNOSTI

PRESENT STATE OF INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zbyněk Bártů

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Zbyněk Bártů**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

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:

Technologie vytavitelného modelu v současnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled nejnovějších trendů v technologii vytavitelného modelu z hlediska používaných surovin a zařízení. Uvedení možností aplikací této progresivní technologie při výrobě náročných odlitků.

Cíle bakalářské práce:

Provedení literární rešerše zaměřené na nejmodernější zařízení a suroviny používané v technologii vytavitelného modelu se zaměřením na výrobu voskového modelu, keramické skořepiny, vytavování vosku a tepelného zpracování keramické formy před odlitím.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, Peter a Robert SMART. Investment Casting. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 09-017-1666-9.

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

HORÁČEK, Milan. Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. In: Technologie vytavitelného modelu [online]. Brno: FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>

TALANDA, Ivan. Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu. Brno, 2012. Diplomová práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Investment Casting Wax. Westechwax: Casting Waxes [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/investment-casting-wax>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

BÁRTŮ Zbyněk: Technologie vytavitelného modelu v současnosti

Bakalářská práce je zaměřena na nejmodernější a nejnovější trendy používané v technologii vytavitelného modelu. Cíl této bakalářské práce je literární rešerše na nejmodernější zařízení, které jsou používány při výrobě voskového modelu, keramických skořepin, vytavování vosku, odlévání a dokončujících operací. První část popisuje krátce historii a vývoj technologie vytavitelného modelu. V následujících kapitolách je rozebrán obecný postup výroby technologie vytavitelného modelu a zařízení vhodná k jeho výrobě.

Klíčová slova: Přesné lití, vosk, keramická skořepina, vytavitelný model, odlitek.

ABSTRACT

BÁRTŮ Zbyněk: Present state of investment casting technology

.The bachelor's thesis is focused on the most modern and latest trends used in investment casting technology. The aim of this bachelor thesis is literary research on the most modern equipment that used wax pattern manufacture, ceramic shell manufacture, de-waxing, metal pouring and finishing operation. The first part describes the history and development of the investment casting technology. The following chapters disclose a general procedure for the production of the investment casting technology and equipment suitable for its manufacture.

Keywords: Investment casting, wax, ceramic shell, lost wax, casting.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BÁRTŮ, Zbyněk. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno, 2017. 46s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

Dne 26.5. 2017 v Brně.

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Obsah

Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
ÚVOD	10
1 Historie	11
2 Základní princip technologie vytavitelného modelu	12
3 Výroba voskového modelu	13
3.1 Matečné formy pro voskové modely	13
3.2 Vstřikovací zařízení	15
3.3 Zhotovení voskového modelu	16
3.3.1 Gravitační lití	16
3.3.2 Vstřikování do formy	16
3.3.3 Vstřikovací stroje	17
3.4 Sestavování voskových modelů	17
3.4.1 Sestava jediného modelu	17
3.4.2 Sestava více modelů	18
3.5 Zařízení k sestavování voskových sestav	19
4 Výroba skořepin	20
4.1 Materiály	20
4.1.1 Pojiva	20
4.1.2 Žáruvzdorné materiály	20
4.2 Odmašťování voskového modelu	21
4.3 Obalování	21
4.3.1 Obalování v obalové hmotě	21
4.3.2 Posypávání	23
4.4 Sušení a chemické vytvrzování	24
4.4.1 Sušení	24
4.4.2 Chemické vytvrzování	26
4.5 Dopravníky a manipulační zařízení	26
4.6 Vytavování vosku	28
4.6.1 Vytavování za nízké teploty	29
4.6.2 Vytavování za vysokých teplot	29
4.6.3 Vytavování mikrovlnným způsobem	29
4.6.4 Vytavování horkým vzduchem	29
4.6.5 Vytavování v autoklávu	29
4.7 Keramické žíhání skořepin]	30
5 Odlévání	32
5.1 Klasické lití	32
5.2 Sklopné lití	33
5.3 Tavení a gravitační lití ve vakuu	33
5.4 Vakuové nasávání	34
6 Dokončovací operace	35
6.1 Odstranění keramiky	35
6.2 Oddělování odlitků od vtokového systému	36
6.3 Odstranění zbylé keramiky	36

6.3.1 Abrazivní metody	36
6.3.2 Chemické metody	37
6.3.3 Neabrazivní metoda	37
6.4 Dokončující operace	38
6.5 Kontrola odlitků	39
6.5.1 Vizuální kontrola	39
6.5.2 Kapilární defektoskopie	39
6.5.3 Měření spektrometrem	40
6.5.4 Rentgen	40
6.5.5 Ultrazvuk	41
6.5.6 Metalografie	41
6.5.7 Metoda pro rozměrovou kontrolu	41
Závěr	42

Seznam použitých zdrojů

Seznam obrázků

ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Technologie vytavitelného modelu je výrobní metodou, která bývá také často označována jako „Lost wax process“, vzhledem k roli, jakou vosk v této technologii hraje. Tato technologie je jednou z nejvíce používaných slévárenských technologií. Důvodem je dosažení vysokých přesností lití, dobré kvality povrchu a také tvarové složitosti odlitků. Metoda vytavitelného modelu je ale také jednou z nejnáročnějších a nejsložitějších. U odlitků je snaha dosažení takové kvality, aby nebylo nutné potřeba užití dokončujících operací. K odlévání lze využít velkou škálu materiálů. V dnešní době má technologie vytavitelného modelu využití v mnoha průmyslových odvětvích jako jsou letecký průmysl, zdravotnictví, automobilový průmysl, energetika, zbrojní průmysl, lodní průmysl a třeba také i ve sportu.

Bakalářská práce je literární rešerše, se zaměřením na nejmodernější zařízení používané v technologii vytavitelného modelu v současnosti, se zaměřením na výrobu voskového modelu, keramické skořepiny, vytavování vosku a tepelné zpracování keramické formy před odlitím.



Obr. 1 Odlitky [2], [4]

1 Historie [1], [2], [3], [4]

Kořeny technologie vytavitelného modelu sahají až zhruba 6000 let do historie. Mezi prvními oblastmi, které využívaly technologii vytavitelného modelu byly starověká Mezopotámie, Čína, Indie, Egypt a části Evropy. Modely byly nejčastěji ze včelího vosku, na



Obr. 2 Odlitek hřebenu ze zlata [2]

kteřé byla nanesena vrstva hlíny např. jílu. Tuto technologii, která byla založena na stejném principu jako ta dnešní, byla využívána nejčastěji k výrobě různých sošek, šperků. Nejvíce používané materiály byly zlato, stříbro a bronz.

Technologie vytavitelného modelu měla plodné období v době renesance, obzvláště v renesanční Itálii. Nejznámější je socha „Persea držícího hlavu medúzy“ italského zlatníka Celliniho, který také popsal třeba odvzdušnění a nálitkování.

V 19. století se výroba odlitků vytavitelným modelem moc nerozšířila, až ke konci století se začala prosazovat v zubní technice (korunky, zubní protézy) a bižuterii.

Přesné lití zaznamenalo ve 20. století mnoho změn. Začalo být hojně využíváno v období 2. světové války. Přispěla k tomu také řada inovací, např. zavedení rozměrově stálých modelových hmot,

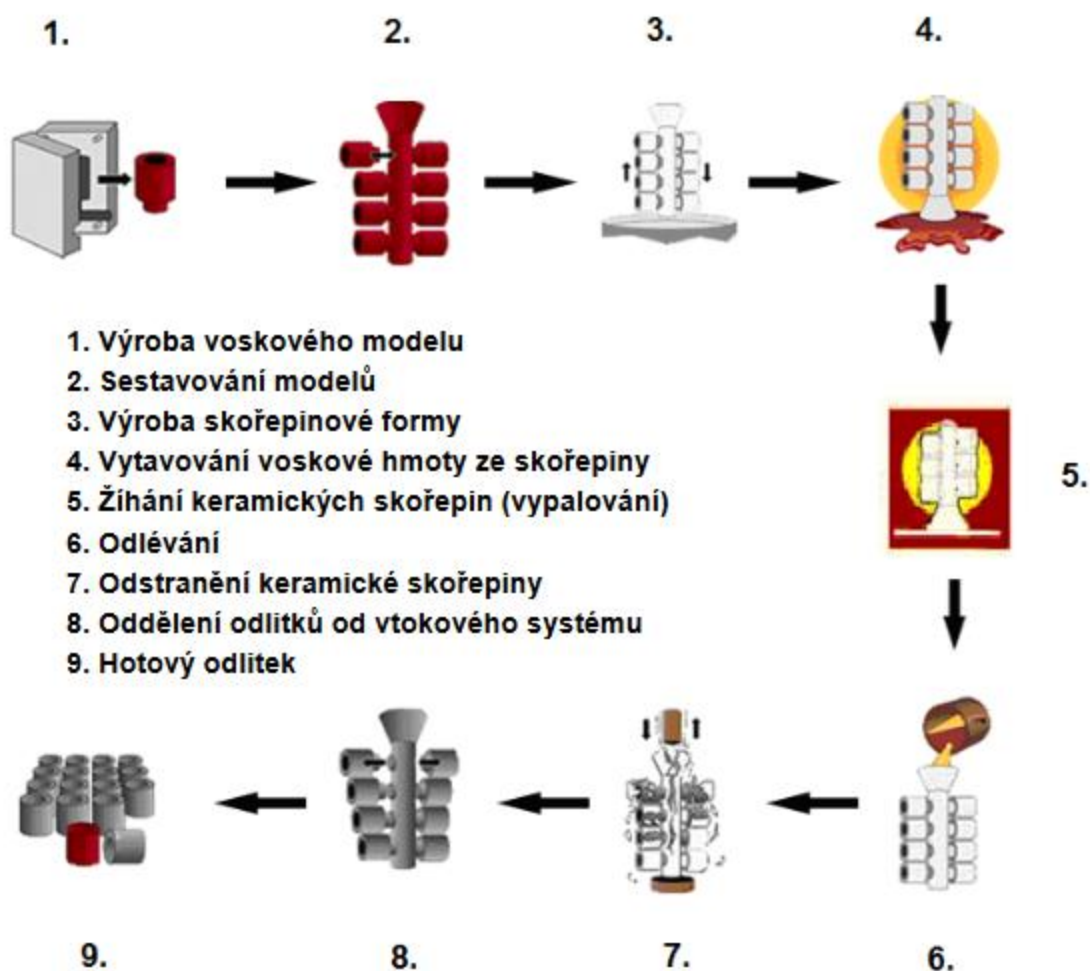
technologie samotné skořepiny o vysoké pevnosti a rozměrové stálosti za vyšších teplot.

Dnes je tato technologie rozšířená po celém světě s využitím v mnoha odvětvích průmyslu.

Ve 20. letech minulého století byla založena „Světová organizace slévačů“, dnes známá jako WFO (World Foundry Organization) a jednou z pěti zakládajících zemí bylo Československo.

2 Základní princip technologie vytavitelného modelu [2],[3]

Technologie vytavitelného modelu, se skládá z jednotlivých kroků, které na sebe navazují. Prvním krokem je zhotovení matečné formy, do které je vstřikován vosk a tak vzniká voskový model. Tyto formy mají speciální požadavky na kvalitu. Jsou vyráběny z různých materiálů, například sádry, zinkových slitin, nízkotavitelných slitin a dalších. Druhým krokem procesu je připojování voskových modelů ke vtokové soustavě. Menší voskové modely se sestavují do takzvaných stromečků. Sestavují se pomocí pájení a lepení. Po sestavení modelu dochází k výrobě skořepinových forem. Opakovaným ponořováním do keramické břechky a následným posypem žáruvzdorným materiálem a jeho vysušením, vzniká keramická skořepina. Po vyschnutí skořepinových forem dochází k vytavování vosku uvnitř forem. Skořepinové formy jsou po vytavení vosku žíhány v žíhacích pecích. Do takto připravených forem odléváme roztavený kov v co nejkratším čase po vytažení z žíhacích pecí. Důvodem je snížení teplotního šoku. Po vytuhnutí kovu dochází k dokončovacím operacím. První dokončovací operací je odstranění keramické skořepiny. Keramická skořepina se odstraňuje nejčastěji mechanicky (odklepáváním). Po odstranění skořepiny dochází k odřezávání jednotlivých modelů od vtokové soustavy. Dále mohou následovat dokončovací operace jako například broušení. Po dokončovacích operacích, kvůli požadované vysoké přesnosti modelů, je nutná kontrola



Obr. 3 Princip technologie vytavitelného modelu [3]

3 Výroba voskového modelu [2], [3],

Voskové modely jsou závislé na kvalitě matečné formy. Matečné formy bývají nejčastěji zhotoveny z kovových materiálů, bývají vyráběny různými způsoby. Pokud je menší sériovost, materiál matečné formy může mít nižší životnost a tak klesají výrobní náklady. Výroba voskového modelu je jednou z nejdůležitějších částí procesu výroby odlitků.

3.1 Matečné formy pro voskové modely [2], [3], [5], [6], [7]



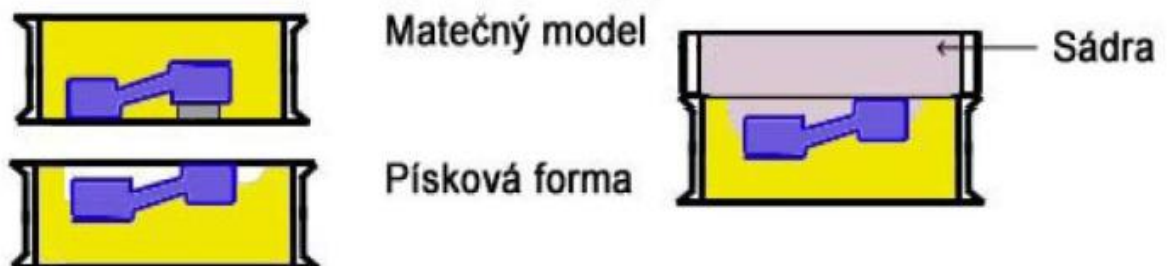
a) Kovové formy

Vhodné k použití pro velkosériovou výrobu. Mají vysokou přesnost a životnost. I přesto, že k výrobě není potřeba matečného modelu, je tento způsob velmi nákladný. Formy jsou vyráběny z oceli a slitin hliníku. Pokud se v modelu nachází dutiny, je nutné u kovových forem použít výsuvná jádra.

Obr. 4 Kovová matečná forma [6]

b) Formy ze sádry

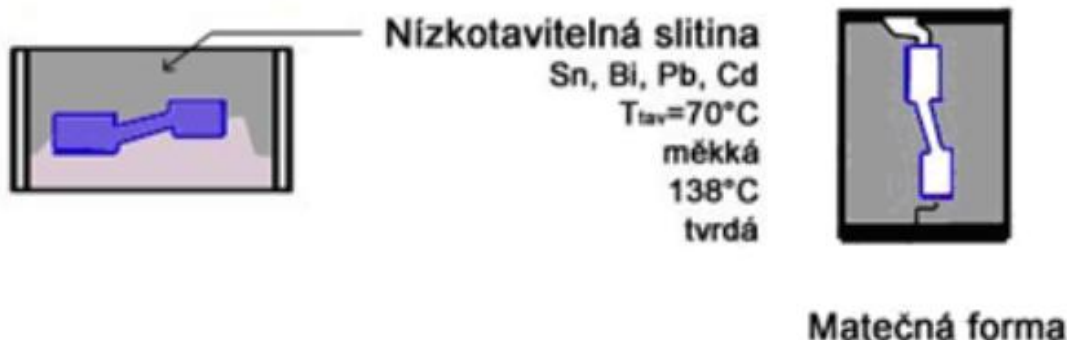
Jsou vyráběny pomocí matečného modelu. Matečný model je zalit sádrkou. Mají nízkou životnost a rozměrovou přesnost. Používají se jen zřídka, nejvíce jsou využívány zejména v umění. Vosk se plní pomocí gravitačního lití.



Obr. 5 Princip formy ze sádry [7]

c) Formy z nízkotavitelných slitin

K výrobě je použit kovový matečný model, který je usazen v ocelovém plášti a z druhé strany je zalit nízkotavitelnou slitinou. Výhodou této formy je vysoká rozměrová přesnost, rychlá a jednoduchá výroba. Nevýhodou je nízká životnost, kvůli které bývají tyto formy využívány v malosériové výrobě.



Obr. 6 Princip výroby formy z nízkotavitelných slitin [7]

d) Formy vyrobené galvanoplasticky

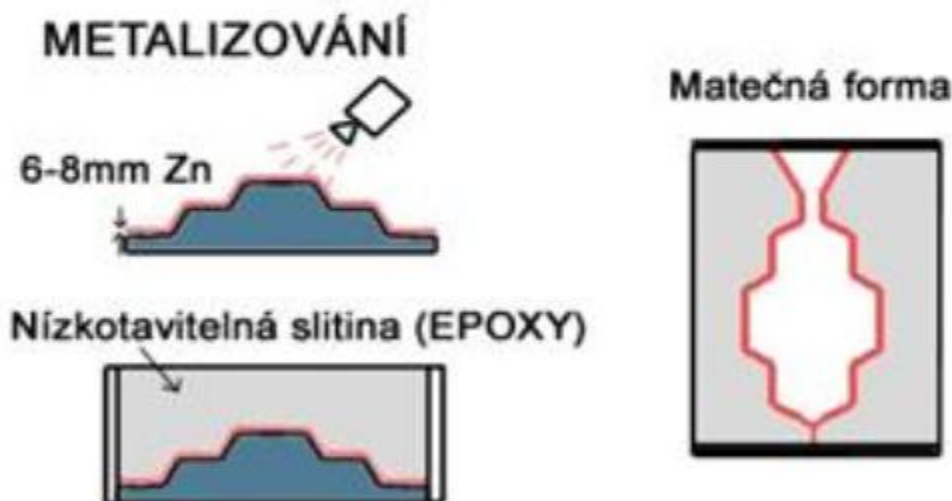
K výrobě této formy se využívá principu elektrolýzy. Na matečný model, který je ponořen do elektrolytu se nabalí vrstva kovu o tloušťce 0,4-4 mm, následuje zalití této vrstvy epoxidovou pryskyřicí. Vhodné pro velmi přesné modely, ale ne příliš těžké.



Obr. 7 Princip výroby formy vyrobené galvanoplasticky [7]

e) Formy vyrobené metalizováním

Výroba formy je založena na natavení a vrhání roztavených částic kovu metalizační pistolí na povrch matečného modelu, kde se tyto částice deformují, spojují a vytvářejí vrstvu o tloušťce 3 mm. Pomocí epoxidové pryskyřice je zalita vzniklá vrstva. Výhodou je životnost forem a rychlá výroba.



Obr.8 Princip výroby formy metalizováním [7]

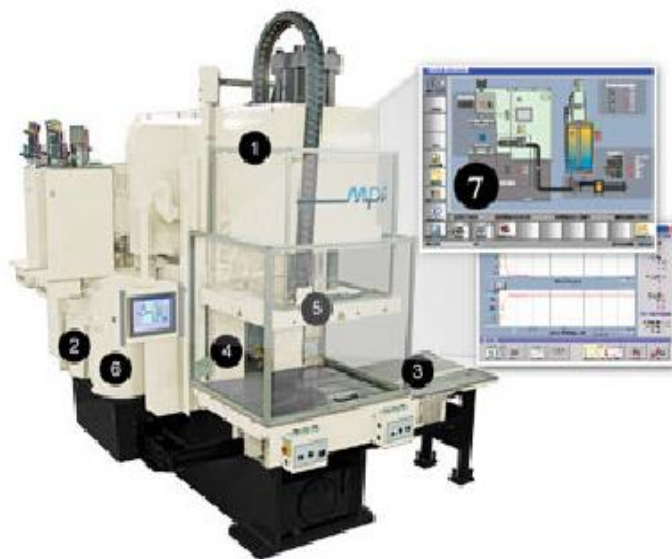
3.2 Vstřikovací zařízení [8], [9]

Při výrobě voskových modelů se přechází na automatická vstřikovací zařízení, které urychlují výrobu voskového modelu. Automatizací výroby snižujeme pracovní náklady a umožňujeme úplné odstranění změn vyvolaných operátorem. Až 50% všech defektů je způsobeno špatnou manipulací obsluhy. Dosahujeme také zkrácení výrobního času až od 50% a tím se získává větší výnosnost.



Obr. 9 Vstřikovací automat [8]

Řada vstřikovacích automatů 55 C-frame může být automatizována s šestiosým robotem. Vakuový vstřikovací robot ovládá všechny operace, které běžně provádí operátor. Všechny automatizované operace jsou automatizovány pro maximální efektivitu. Automatizované operace jsou například vstřikování vosku, čištění voskového modelu, vkládání jádra a další. Velkou výhodou automatizace je až zdvojnásobení výroby voskových modelů, než při ruční výrobě. Další výhodou je snížení vad voskových modelů, k jejich kontrole můžeme využít i rentgen, který je v tomto zařízení využíván.



1. Pevný C-Frame- paralelní otvírání, rovnoměrné upínání, snadný přístup
2. Zásobníky vosku
3. Jednopásový stůl
4. Programovatelná tryska
5. Vytápění a chlazení desky
6. Vosková nádrž s pěti zónami, teplotně řízený vstříkovací systém
7. Kontrolní a ovládací systém. Řízení procesů s grafem vstříkování v reálném čase.

Obr. 10 Popis vstříkovacího stroje [8]

3.3 Zhotovení voskového modelu [2], [3]

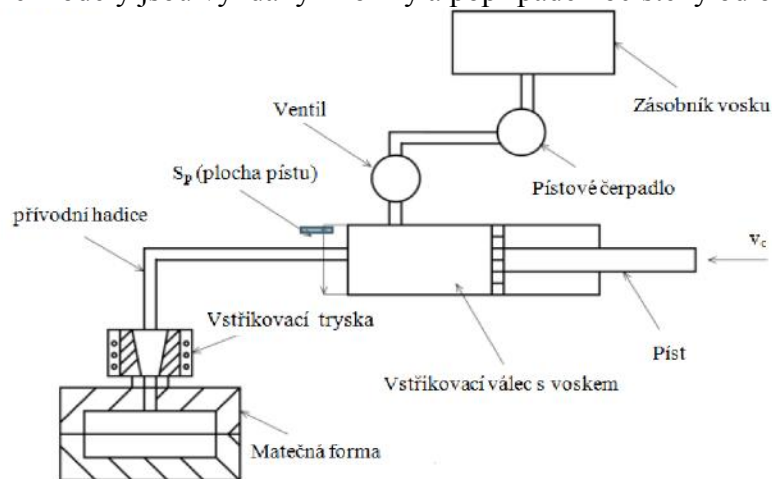
Naplnit formy můžeme dvěma způsoby, gravitačním litím nebo vstříkáváním.

3.3.1 Gravitační lití

Gravitační lití se používá v dnešní době jen výjimečně. Bývá používáno k výrobě jednoduchých modelů nebo k výrobě vtokových kanádků.

3.3.2 Vstříkování do formy

Hlavní metodou výroby voskových modelů je vstříkování vosku do formy. Využívají se k tomu speciální vstříkovací lisys. Roztavený vosk o teplotě 50-90 °C je pod tlakem vstříkáván do formy. Ztuhlé modely jsou vyndány z formy a popřípadě i očištěny od otřepů.



Obr. 11 Princip vstříkování vosku do formy [2]

3.3.3 Vstřikovací stroje

Vstřikovací stroje můžeme rozdělit do tří skupin. Dělí se podle stavu vosku.

a) Vstřikovací stroj pracující s tekutým voskem

Ke vstřikování se využívá tlak o hodnotě 0,5-1MPa. Vosk je vstřikován v tekutém stavu. Stroj tohoto typu se skládá z vyhřívaného zásobníku vosku, vstřikovací jednotky a vstřikovací trysky.

b) Vstřikovací stroje pracující s kašovitým voskem

Vstřikovací tlak je 2,5-5MPa. Vstřikovaný vosk se používá v těstovitém stavu. Voskové modely vzniklé z kašovitého vosku jsou rozměrově přesnější, ale mají horší kvalitu povrchu.

c) Vstřikovací stroje s tuhým voskem

Vosk je připraven jako voskový polotovár ohřátý na požadovanou teplotu. Při stlačování vosku skrz trysku je jeho viskozita snižována, to způsobí změknutí polotovaru a dokonalé vyplnění dutiny formy.

3.4 Sestavování voskových modelů [2], [7], [8], [9]

Modely jsou vyráběny ve formách jednotlivě. Poté bývají přilepeny nebo připájeny vhodně na vtokovou soustavu. Zvláštní vtokové soustavy vyžadují kusové a tvarově složité odlitky. Podle počtu modelů se dělí na:

3.4.1 Sestava jediného modelu

Tento způsob výroby se využívá pro složité členěné odlitky a také pro rozměrnější odlitky. Vtoková soustava se vyrábí ve zvláštních formách a připevňuje se buď pájením, nebo lepením.



Obr. 12 Sestava jediného modelu [7]

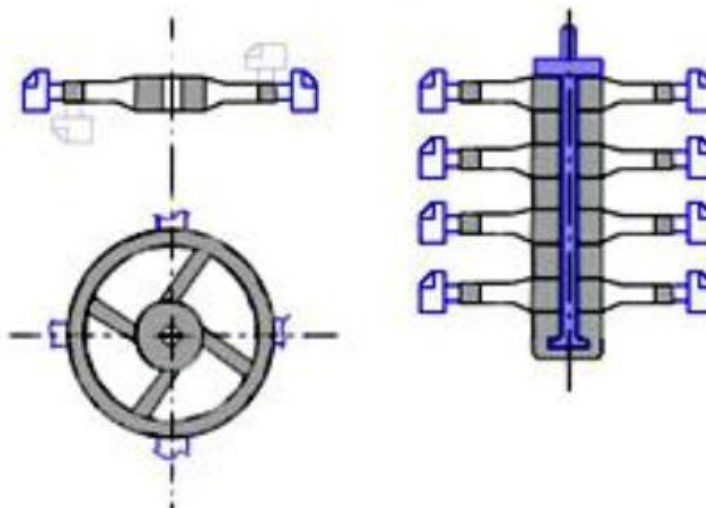
3.4.2 Sestava více modelů

Sestavu více modelů můžeme také nazvat takzvaným stromečkem. Modely se jednotlivými vtoky připevňují na vtokovou sestavu lepením nebo pájením. Tvar stromečku je přizpůsoben tak, aby při obalování se vytvořila skořepina na všech částech modelu a zůstala zároveň mezera mezi jednotlivými modely. Při vytavování vosku z modelu může dojít k tomu, že vosk není dokonale vytaven. Řešením je připojení pomocného výfuku nebo pomocných otvorů. Tvar stromečku ovlivňují také další faktory, jako způsob vytavování, způsob lití a oddělování odlitků.



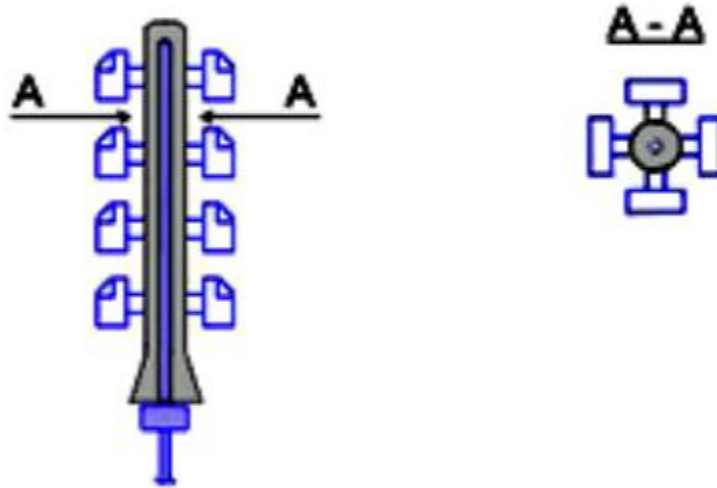
Obr. 13 Sestavování modelů do stromečku [7]

Možnosti sestavení modelů do stromečku
a) modely sestavené horizontálně – etážově



Obr. 14 Modely sestavené horizontálně [7]

b) modely připevněny přímo na vtokový kůl



Obr. 15 Modely připevněny na vtokový kůl [7]

3.5 Zařízení k sestavování voskových sestav [8], [9]

Automatizace při sestavování voskových modelů do sestav prošla řadou inovací a pokroků. Společnost MPI neustále zdokonaluje své patentované automatizované zařízení pro sestavování voskových sestav. Vyvinula vlastní patentovaný proces pro svařování ve svých zařízeních. Automatizace se opakovaně ukázala, že stroj založený na robotice může překonat ručně vytvořené sestavy s přesností, opakovatelností a efektivitou. S automatizací se zvyšuje počet vytvořených voskových sestav, protože robotika umožňuje vysoce přesné a opakovatelné umístění a připevňování jednotlivých modelů ke vtokové sestavě.



Obr. 16 Model 20-14 [9]

Automatizace zajišťuje rychlejší dobu cyklu 2-5 krát, vysokou kvalitu svarů a odstranění vad vzniklých působením operátora.

Model 20-14 viz (obr. 16) je postaven na patentovaném procesu svařování voskem společnosti MPI. Zařízení je vybaveno universálním šestiosým ramenem, který slouží k lepší manipulaci s většími a složitějšími sestavami.

4 Výroba skořepin [2], [3], [5], [6]

Skořepina je vyráběna obalováním voskového modelu, po kterém následuje vytavení vosku a nakonec je skořepina vyžihána. Díky přesné výrobě skořepin můžeme vyrábět širokou škálu odlitků, můžeme vyrobit takové tvary, které jsou jinými metodami nedosažitelné. Vlastnosti keramických slitin umožňují používat široký výběr slitin. Je důležité sledovat teplotu, důvodem je vysoký koeficient tepelné roztažnosti vosku a naopak nízký koeficient tepelné roztažnosti keramiky. Tyto rozdíly mohou způsobovat praskání okolní keramiky.

4.1 Materiály [2], [5]

Skořepina je tvořena třemi složkami, jsou to pojiva, plniva (moučka) a posypový materiál (ostřívo). První dvě složky tvoří takzvanou břechku, do které je sestava stromečku namáčena. Materiály plniva a ostřiva mohou být totožné a můžeme je nazývat žáruvzdorné materiály.

4.1.1 Pojiva

Obalovou hmotu keramických skořepinových forem tvoří pojiva a žáruvzdorné materiály. Pojiva můžeme také nazvat jako vaznou kapalinu. Skořepinové formě by měly předávat tyto vlastnosti: pevnost po vysušení a vyžihání, nesmí snižovat žáruvzdornost formy. Jako pojiva využíváme koloidní roztoky kysličníku křemičitého a organické sloučeniny hliníku, titanu a zirkonu. Křemičitanová pojiva jsou na vodní bázi nebo na bázi alkoholu. Pojiva na bázi alkoholu se vyznačují dobrou pevností při žihání a rychlém sušení skořepiny. Mezi jejich nevýhody patří špatný vliv na životní prostředí, špatné pracovní podmínky pro zaměstnance a zajištění nevybušnosti prostředí. Pojiva na vodní bázi jsou výhodná pro svoji cenu, šetrnost k životnímu prostředí a snadné testování. Dlouhé časy sušení jsou naopak nevýhodou. V praxi jsou nejvíce používaná pojiva na vodní bázi.

4.1.2 Žáruvzdorné materiály

Moučky a posypové materiály jsou žáruvzdorné materiály, které jsou nekovové a anorganické. Žáruvzdorné materiály by měly mít následující vlastnosti: tepelnou roztažnost, žárupevnost, chemickou netečnost vůči odlévanému kovu, cenu a dostupnost.

a) Tavený křemen- je to modifikace oxidu křemičitého. Tavený křemen je uměle vyrobený materiál. Využívá se kvůli nízké tepelné roztažnosti. Používá se jako moučka i posypový materiál.

b) Zirkon - Využívá se jako moučka i posypový materiál. Jeho vysoká cena je důvodem používání jen u náročnějších odlitků, díky vysoké tepelné vodivosti a nízké reaktivnosti vůči odlévaným kovům.

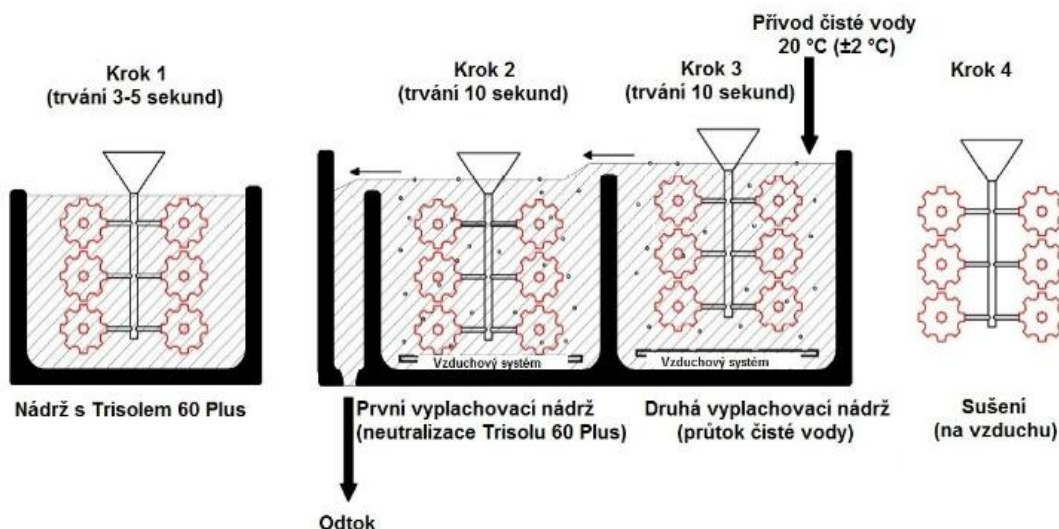
c) Korund- Využívá se jako moučka i posypový materiál. Jeho vlastnosti jsou nízká reaktivnost vůči odlévanému kovu, vysoká tvrdost, žárupevnost a tepelná vodivost.

d) Aluminosilikáty- Jsou tvořeny Al_2O_3 (oxidem hlinitým) a SiO_2 (oxidem křemičitým). Jeho vlastnosti jsou vyšší hmotnost a středně velká tepelnou roztažností. Výhodou aluminosilikátů je příznivá cena. Používají se ve formě moučky i posypových materiálů. Příklady aluminosilikátů jsou molochit, tavený mulit a mulgrain.

e) Křemen- Jedná se o přírodní materiál. Je vhodný na méně náročné odlitky. Je levný, ale obsahuje velké množství nečistot. Používá se jako moučka i posypový materiál.

4.2 Odmašťování voskového modelu [10]

Z povrchu stromečku je nutné při obalování odstranit zbytky dělicích prostředků. Jinak dochází k výrobním poruchám. Nejpoužívanější prostředek na odmašťování je Trisol 60 Plus od firmy Blayson. Jeho výhodou jsou lehké aplikace odstranění uhlovodíků a silikonů z povrchu modelu, lepší přilnavost licího obalu k povrchu modelů a je omyvatelný vodou. Čištění probíhá ve třech krocích. První krok je ponoření voskového modelu do nádrže s roztokem na dobu 3-5 sekund. Druhý krok je oplachování ve vodní nádrži po dobu 10 sekund. Třetí krok je obdobný, model je oplachován v nádrži po dobu 10 sekund viz obrázek(17). Vhodná teplota vody v nádrži je 20°C . Po odmašťování následuje sušení modelu na vzduchu.



Obr. 17 Princip odmaštění [10]

4.3 Obalování [2], [3], [7], [11], [12]

Obalování znamená namáčení stromečků do obalové hmoty, posypání žáruvzdorným materiálem a sušení jednotlivých obalů. Podle potřeby požadované tloušťky dochází k opakování cyklů.

4.3.1 Obalování v obalové hmotě

Usušené modelové stromečky po odmaštění jsou namáčeny do obalové hmoty. Namáčejí se ponořováním, otáčením a nakláněním v obalové hmotě, aby obalová hmota pokryla stromeček rovnoměrně. Obalovací doba ponoru je různá. Po vyndání z obalovací hmoty se

se stromečkem manipuluje, aby přebytečná obalovací hmota odkapala. Existují dva druhy obalů, licí a zesilovací. Licí obal je nanášen na voskový model a poté se dostává do kontaktu s odlévaným kovem. Proto se liší jejich složení. Rozdíl je v typu keramik.

Nádrže na obalovou hmotu jsou plně uzavřeny, aby umožnili bezpečný provoz. Kryt je snadno odpojitelný. V míchacích lopatkách může být zabudované chlazení vodou, pro lepší rozpuštění tepla, které vzniklo míchacím procesem. Nádrže pro obalovou hmotu jsou vhodné pro ruční i robotizovanou linku. Obsahují pevnou řídicí jednotku otáček, která je v robustním krytu. Řada obalovacích směsí je určena pro dlouhou životnost.



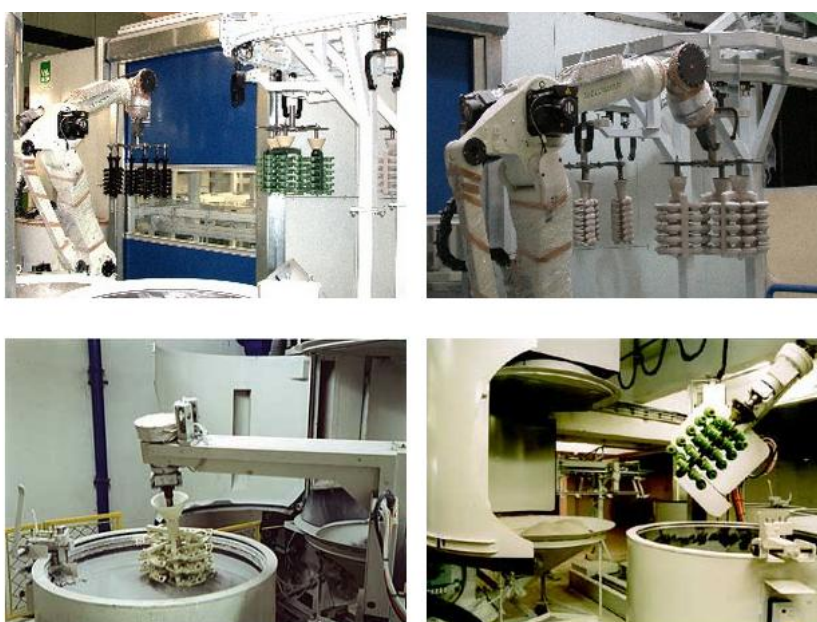
Obr. 18 Nádrž na obalovou hmotu [11]

K řízení stavu hladiny v obalovací nádrži se využívá systém čerpadel. Tento systém je navržen pro vhodný způsob přemísťování obalovacích hmot. Vozík s čerpadlem a míchací jednotkou se snadno přemístí do pracovního provozu. Čerpadlo může přenést obalovací hmotu v množství až 50 l/min v závislosti na stavu obalovací hmoty.



Obr. 19 Vozík s čerpadlem [11]

Míchací zařízení jsou navrženy pro různé míchací režimy a jsou z nerezové oceli. Míchací jednotka je na nastavitelném a otočném držáku pro snadné spuštění a vyzvednutí z obalovací hmoty. Míchací zařízení mohou mít, buď vzduchový, nebo vrtulový mixer.



Obr. 20 Namáčení stromečku pomocí robotického ramene [12]

4.3.2 Posypávání

Po namáčení přichází na řadu posypávání žáruvzdorným materiálem. V dnešní době se rozlišují dva základní způsoby nanášení posypového materiálu a to fluidní a sprchové nanášení. Posypový materiál má různé zrnitosti pro licí obaly a zesilovací obaly. Pro licí obaly je zrnitost 0,175-0,25 mm, pro zesilovací obaly je zrnitost 0,25-0,5 mm.



Zařízení pro sprchové posypávání žáruvzdorným materiálem, jsou vhodná pro robotizovaný provoz, k dispozici jsou v různých provedeních a velikostech. Vybaveny jsou proměnlivým řízením otáček. V zařízení je zabudován čistící systém posypového materiálu. Důležitá je rovnováha hustoty posypového deště a zabránění rozdrcení zrn posypového materiálu mezi pohyblivými ocelovými plochami zařízení. Odsávací systém zabraňuje vysoušení posypového materiálu.

Obr. 21 Zařízení ke sprchovému posypávání [11]



Fluidní posypávání je založeno na ponoření stromečku do vzduchem čerého posypového materiálu. Existují v různých velikostech a provedeních. Ventilátor je přizpůsoben tak, aby vyhovoval nejširšímu rozsahu typů posypových materiálů. Zařízení jsou vybavena odsáváním prachu a čistícími systémy.

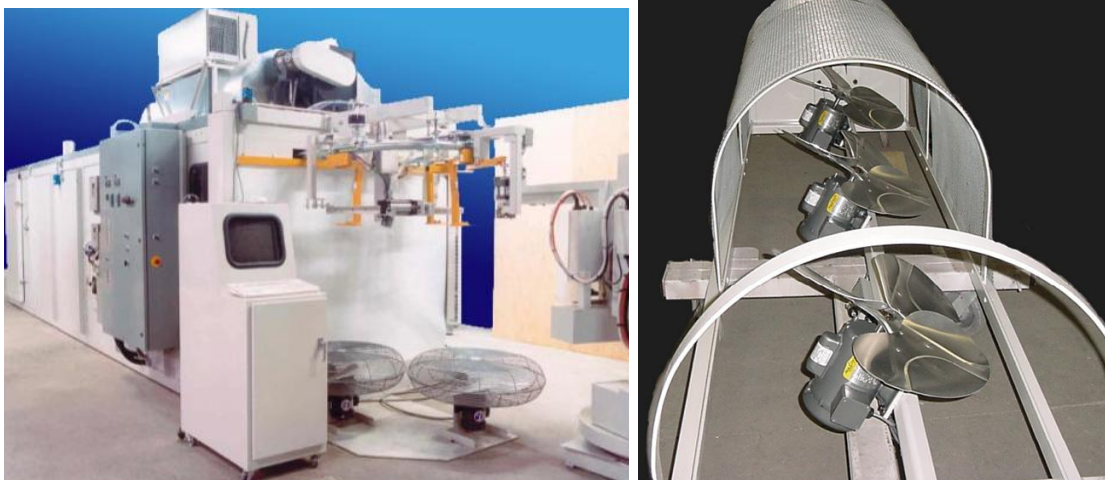
Obr. 22 Zařízení pro fluidní posypávání [11]

4.4 Sušení a chemické vytvrzování [11], [14]

4.4.1 Sušení

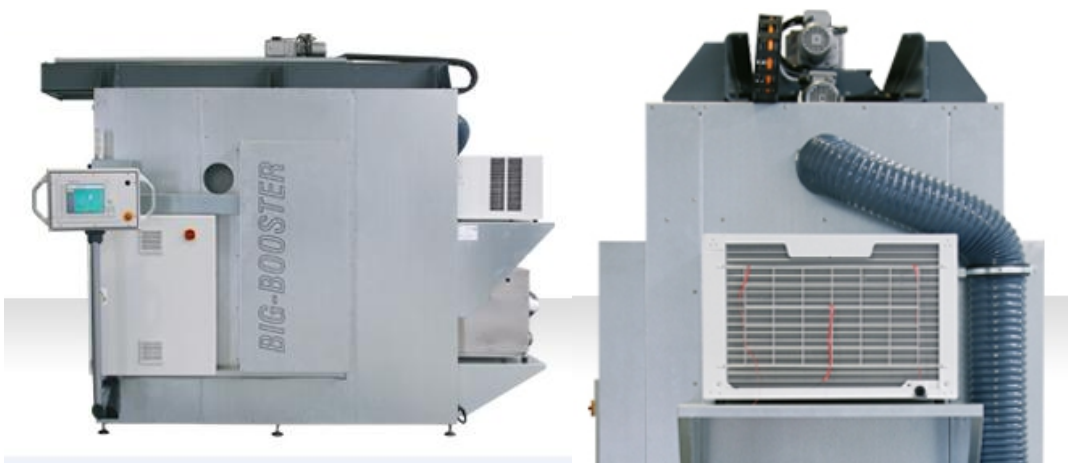
Po obalovacím a posypovém procesu je na řadě tuhnutí obalu. Obaly mohou tuhnout odpařením disperzního prostředí z kapalného pojiva, které vyvolá stavovou změnu soli v gel, nebo pomocí chemického činidla, vyvoláme změnu soli v gel a teprve pak se odpaří disperzní prostředí z pojiva. Keramické obaly schnou při sušení za konstantních podmínek. Po dobu 2-4 hodin při teplotě kolem 20 °C (± 1 °C) a vlhkosti 30-60 % při proudění vzduchu. Zrychlení sušení lze dosáhnout za teploty 25-27 °C a proudění vzduchu minimálně 180m/min.

V procesu sušení je snaha o co největší



Obr. 23 Ventilátory [11]

zkrácení sušící doby. K vysoušení můžeme používat řadu vysoušecích zařízení, jako jsou ventilátory, které zajistí neustálý pohyb vzduchu. Využíváme je v sušících místnostech i při pohybu na dopravnících. Dále můžeme k sušení využít Booster, vysokorychlostní sušící komoru, která byla izolována a zkonstruována jako komora pro kontinuální sušení. Doba schnutí je drasticky snížena. V Boosteru může být jedna skořepina po druhé vysušena a je zvláště vhodná pro rychlou výrobu jednotlivých skořepin během jednoho dne.



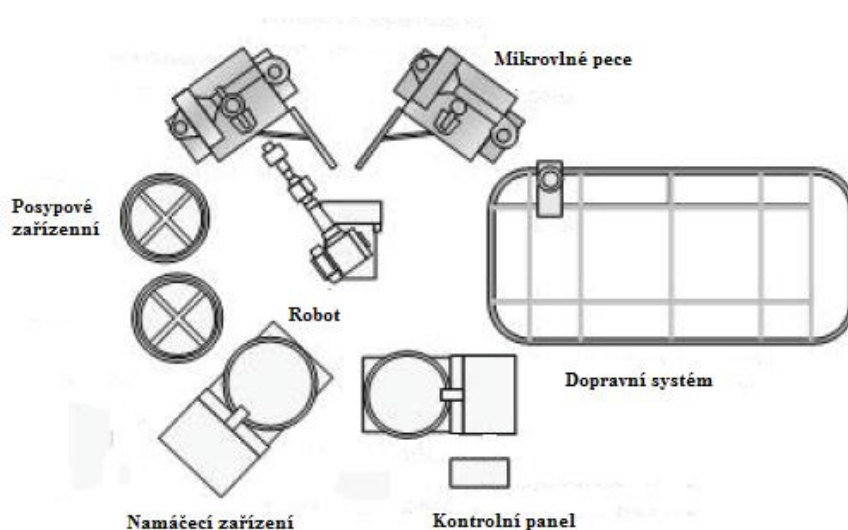
Obr. 24 Booster [14]

Vysokorychlostní sušicí tunel poskytuje příležitost k tomu, aby byla celá výroba vedena přes jednu sušicí linku. Modulární konstrukce umožňuje dokonalé přizpůsobení tunelu každé slévárenské společnosti. Všechny modely se neustále otáčejí a pohybují.



Obr. 25 Sušicí linka [11]

Proces sušení lze značně urychlit pomocí sušení v mikrovlnných pecích. Jde o poměrně velké zkrácení sušících časů. Zatímco při běžných způsobech sušení skořápky trvá přibližně 1-2 hodiny pro 1. a 2. vrstvu, 3 - 4 hodiny pro 3. - 5. vrstvy a 4 - 8 hodin pro následující vrstvy, japonská High Comm mikrovlnná pec suší skořápky pouze po dobu třiceti minut na jednu vrstvu.



Obr.26 Schéma linky s mikrovlnnými pecemi [11]



Obr. 27 Mikrovlnná pec [11]

4.4.2 Chemické vytvrzování

Jedná se o urychlené sušení chemickým vytvrzením. Urychlení je dosaženo pomocí užití alkalicky reagujících látek. Obaly se suší nejprve na krátkou dobu na vzduchu, další krok je vystavení posypaných obalů opět na krátkou dobu plynnému amoniaku. Pomocí proudu vzduchu nebo vakuováním jsou odstraněny čpavkové páry z obalů. Poté se proces opakuje namočením, odkapáním, posypáním a sušením, až do doby, kdy má skořepina potřebnou tloušťku. Následuje po dosažení potřebné tloušťky sušení podle potřeby po dobu 3-8 hodin.

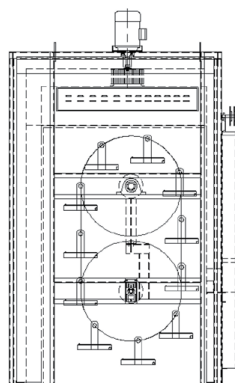
4.5 Dopravníky a manipulační zařízení [11], [13], [14], [15]



Obr. 28 Dopravníky [11]

Dopravníkové systémy přepravují i pomocí robotů modely po slévárně z jedné operace na druhou. Vzhledem k automatizaci sléváren umožňují dopravníky plynulý tok mezi jednotlivými operacemi.

Dopravníkové systémy mohou mít spoustu řešení, je možnost horizontálního řešení i vertikálního řešení.



Obr. 29 Vertikální dopravník [11]

V roce 1973 společnost Shell-O-Matic zavedla první elektromotorické roboty do sléváren, které se zabývaly technologií vytavitelného modelu. V dnešní době zaujmuli roboti důležitou roli při automatizování sléváren. Existuje široká škála šestiosých robotů o různých pracovních náplních.

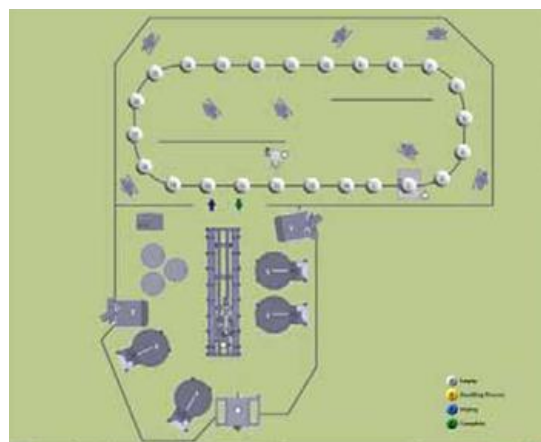


Obr. 30 Robotické rameno [11]

Propojením počítačových řídicích programů, dopravníků, robotických ramen, sušících a obalových zařízení můžeme vytvořit plně automatizovanou linku. Od vložení sestavy až po dokončení skořepiny, systém udržuje záznam o procesu a zároveň poskytuje kontrolu kvality.



Obr. 31 Automatizovaná linka [11]



Obr. 32 Kontrolní systém linky [13]

Cyclona je první stroj pro výrobu kompletní keramické skořepiny, která kombinuje 5 stanic. Po spuštění je keramická skořepina hotová do 4 hodin. Zařízení obsahuje 2 nádrže na obalovou hmotu, 1 až 3 zařízení pro sprchový posyp, ovládací panel, displej a srdce cyclony, kterým je vysokorychlostní sušící komora booster.

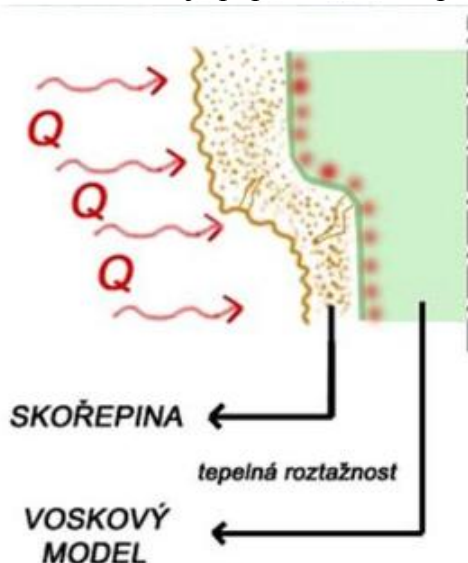


Obr. 33 Cyclona [14]

4.6 Vytavování vosku [3], [7], [15], [16], [17], [18]

Pokud má skořepina požadovanou tloušťku a je dokonale vysušena, je potřeba vytavit voskový model. Hlavním úkolem je vytavit všechnen vosk ze skořepiny bez jejího poškození. Zařízení k vytavování voskového modelu jsou vyráběny tak, aby vytavený vosk byl zachycen a byl použit k regeneraci voskové směsi. Vosk je také využíván k odhalování vad. Příkladem je prosakování vosku skrz praskliny. Pro tento účel je vhodnější tmavší vosk.

Velká tepelná roztažnost vosků a nízká tepelná roztažnost skořepin je velký problém tohoto procesu. Teplota tavení vosku je 60-90 °C, při této teplotě může docházet k popraskání keramické skořepiny. Předcházet popraskání můžeme pomocí dilatačních spár. Dilatační spára se vytvoří pomocí rychlého ohřevu. Tento rychlý ohřev lze nazvat tepelným šokem. Dojde k natavení tenké vrstvy vosku, která přiléhá k obalové vrstvě. Tím vzniká dilatační spára, která zabraňuje popraskání skořepiny.



Obr. 34 Dilatační spára [7]



Obr. 35 Skořepina po vytavení [7]

4.6.1 Vytavování za nízké teploty

Vytavování za nízké teploty probíhá v přehřáté lázni. Lázeň obsahuje roztavenou hmotu o stejném složení jako je hmota modelů. Jsou to nízkotavitelné slitiny jako jsou cín, olovo a antimon. Vytavení probíhá po dobu 10-15 minut. Často používanou metodou je vytavování ve vroucí vodě. Vytavování probíhá po dobu 10-20 minut. Výhodou je menší riziko popraskání.

4.6.2 Vytavování za vysokých teplot

Vytavování probíhá v pecích za teplot 750-1100 °C a zároveň dochází k vypálení skořepin. Formy jsou orientované směrem dolů pro snadnější vypálení a zachycení vosku. Vypalování trvá po dobu 15-25 minut. Nevýhodou jsou ztráty vosku 10-15%.

4.6.3 Vytavování mikrovlnným způsobem

Princip této metody je vkládání navlhčených forem do mikrovlnného pole. Díky vlhkosti formy dochází k rychlému ohřevu.

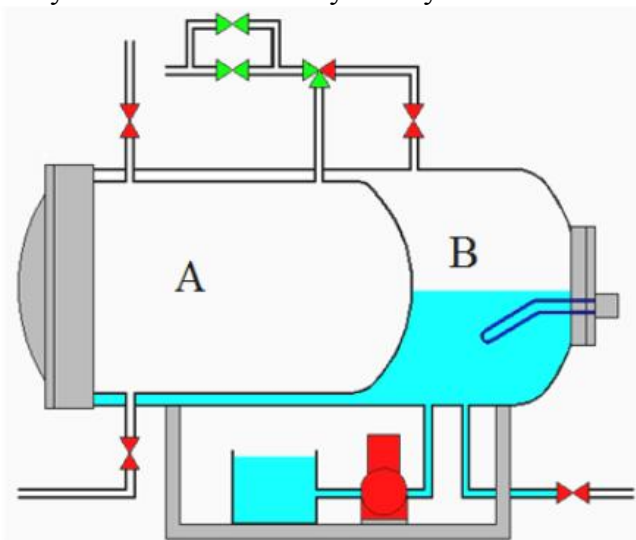
4.6.4 Vytavování horkým vzduchem

Zavedením horkého vzduchu do vtokového systému, je dosaženo protavení vtokového systému a tím se zajistí odtavování zevnitř. Výhodou je zabránění praskání skořepin.

4.6.5 Vytavování v autoklávu

Jedná se o nejpoužívanější metodu. Využívá sytou vodní páru v uzavřených tlakových nádobách. Skořepiny jsou umístěny tak, aby z nich vosk vytékal. Výhody jsou vysoká účinnost, snadné zachycení vytaveného vosku a dobré vlastnosti páry na přenos tepla.

Konstrukce dveří Quicklock viz obr 38, která je patentovaná firmou LBBC, nabízí rychlý, bezpečný a snadno ovládatelný uzamykací mechanismus, vhodný pro širokou škálu tlakových



Obr. 36 Princip bojlerklávu [17]

kontejnerů. Výhodou je, že zrychlují proces, zlepšují bezpečnost a spolehlivost, vhodné jak pro tlak, tak i pro vakuum.

Princip činnosti bojlerklávu

V části B se tvoří pára k vypalování vosku, pára přechází do komory A, kde jsou umístěny skořepiny a kde dochází k vytavení. Klesající tlak v komoře B způsobí generování více páry a ta během 4 sekund obklopí skořepiny v komoře.

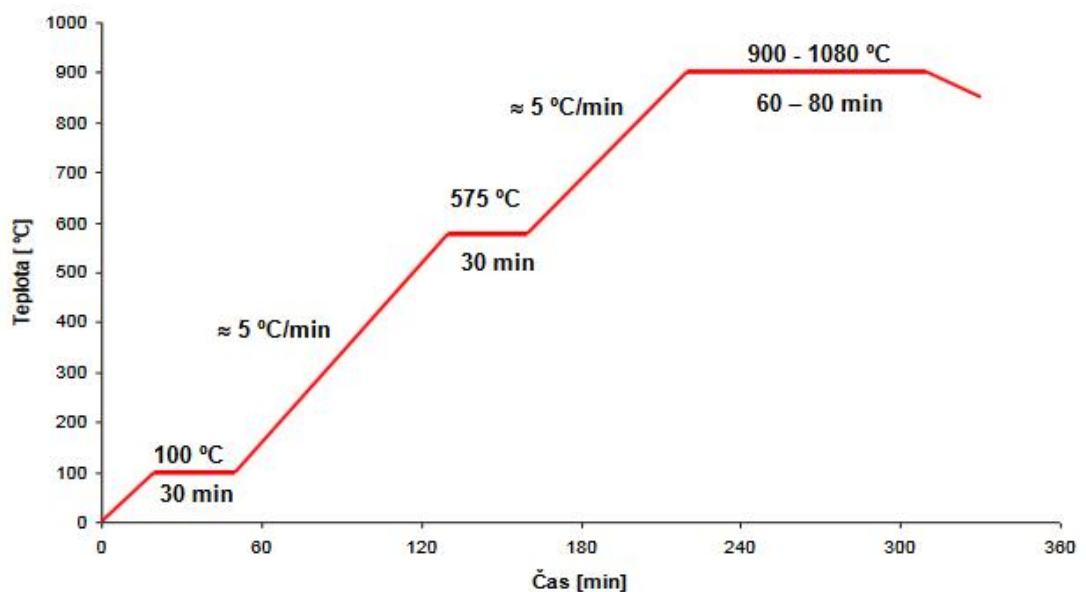


Obr. 37 Boilerclave [18]

Obr. 38 Quicklock [17]

4.7 Keramické žíhání skořepin [3], [7]

Po vytavení vosku je potřeba skořepiny vypálit. Pomocí žíhání převedeme amorfni formy vazné vrstvičky SiO_2 na formu krystalickou a také odstranění těkavých látek. Žíhací teplota je 900-1000 °C pro SiO_2 . Pro monolit a korund jsou žíhací teploty 1200-1400 °C. Teplota pece při vkládání skořepin je 300-400 °C. Sníží se tím teplotní náraz, pomalým ohříváním se zabrání odlupování a praskání vrstev. Poté se teplota zvyšuje až na hranici 575 °C, kdy nastávají objemové změny, proto se na této teplotě zůstává 30 minut. Následuje zvyšování teploty až na požadovanou hranici a setrvání na ni po dobu 60-80 minut. Pokud je skořepina z křemenné moučky, tak je zde rozdíl v době setrvání v žíhací teplotě. Je to 20-30 minut. Po vyžíhání dojde k vizuální kontrole, pokud je bez vad, je vhodná k odlévání. Tři hlavní důvody vypalování skořepin před odléváním.



Obr. 39 Proces žíhání [7]

a) Odstranění zbytkového materiálu-Pro jeho odstranění je nutné zahřát skořepinu na 1000 °C. Při této teplotě dochází k odstranění nežádoucích látek, jako je vosk voda a alkohol.

b) Zhutnění struktury keramiky- převodem amorfni formy vazné vrstvičky SiO₂ na formu krystalickou je dosaženo tvrdosti a pevnosti.

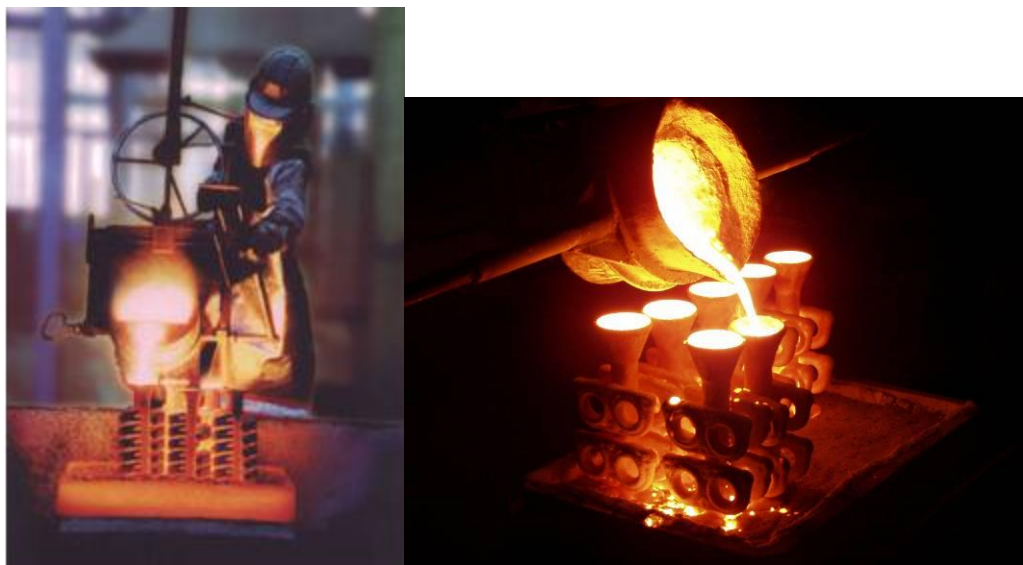
c) Předehřátí skořepin před odléváním- provádí se pro snížení teplotního šoku před odléváním



Obr. 40 Žihací pec [7]

5 Odlévání [3], [7]

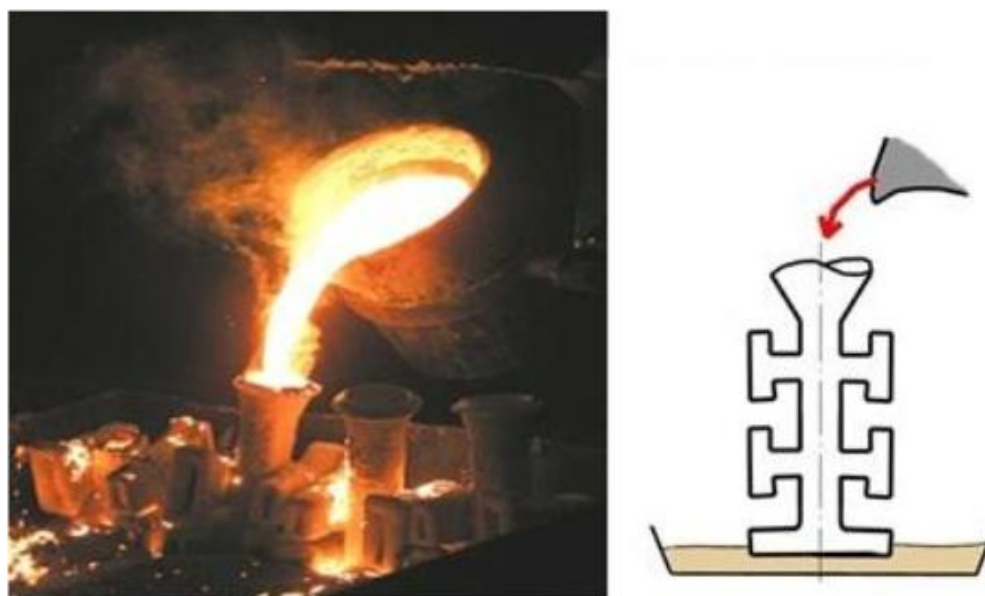
Odlévat je možno různé druhy slitin. Odlévání je velmi důležitým procesem, jelikož způsob lití a teplota kovu ovlivňuje strukturu odlitku a jeho vlastnosti. K tavení kovu se používají indukční, jádrové, bezjádrové a vakuové pece. K odlévání dochází ihned po vyndání skořepin z žhacích pecí, kvůli zmenšení teplotního šoku. Skořepiny mohou být přehřáté na 700-800 °C. Lití probíhá dvěma způsoby, buď na vzduchu, nebo ve vakuu



Obr. 41 Odlévání [7]

5.1 Klasické lití

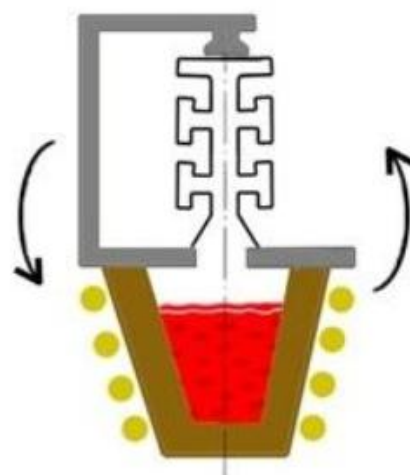
Roztavený kov se vlévá do skořepiny za přístupu vzduchu na licím poli. K zatečení je využita vlastní hmotnost kovu. Metodu můžeme nazvat též jako gravitační lití.



Obr. 42 Klasické lití [7]

5.2 Sklopné lití

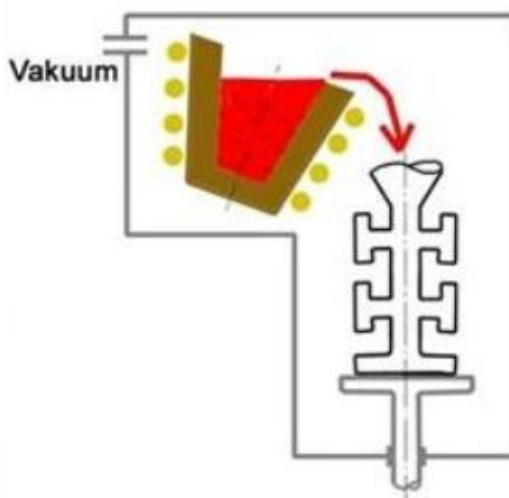
Princip této metody je připevněná forma k otočné tavící peci, v níž je roztavený kov. Po naklonění pece kov vyplní formu.



Obr. 43 Princip sklopného lití [7]

5.3 Tavení a gravitační lití ve vakuu

Ve vakuové komoře je pec i forma k odlití. Kov se nataví a odlévá se za postupného snížení podtlaku.

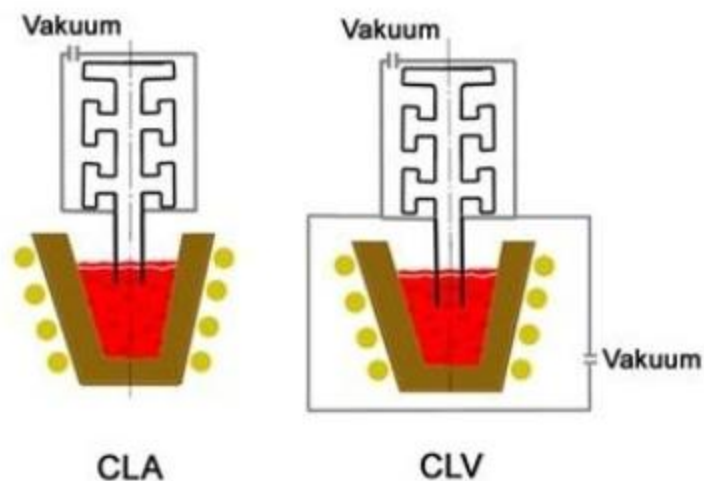


Obr. 44 Gravitační lití ve vakuu [7]

5.4 Vakuové nasávání

Princip metody je umístění skořepiny nad kelímkem s roztaveným kovem, ten se do formy nasaje pomocí podtlaku. Kov ve formách odlitků po nasátí začne tuhnout, ale ve vtokovém kůlu je kov pořád natavený. Při uvolnění podtlaku se vrací zpět do kelímku. Vakuovým litím lze odlévat i vysoce reaktivní kovy, jako je třeba hořčík.

Rozlišujeme dvě metody vakuového nasávání CLA a CLV. U metody CLA se kov netaví ve vakuu, u metody CLV se kov ve vakuu taví.



Obr.45 Příklad vakuového nasávání [7]

6 Dokončovací operace [7], [16], [18], [19], [20]

Další operace po odlití a zchladnutí odlévaného kovu se řadí mezi dokončovací operace. Jsou v následujícím pořadí, odstranění skořepiny, oddělení odlitků od vtokové soustavy, odstranění nerovností a zbylé keramiky a poslední část je kontrola.

6.1 Odstranění keramiky [7], [16], [18], [19], [20]

Pokud je odlitek odlit a dokonale ztuhnut je potřeba odstranit keramickou skořepinu. Jelikož je skořepina tvrdá, lze ji odstranit velmi těžce. Používá se mechanické oklepávání. Využívá se pneumatické kladivo. Odstraňovací operace sebou nese hluk a prach, proto se odlitek uzavírá do vzduchotěsné a prachotěsné komory, kde je vibrační stroj. Po úderech kladiva začne skořepina praskat a odpadávat. Další metodou odstraňování keramických skořepin, je metoda tryskání vysokotlakého vodního paprsku. Vzhledem k bezpečnosti je vysokotlaký vodní paprsek umístěn ve speciální kryté kabině, která je automatická nebo může být obsluhována dělníkem. Vodním paprskem je umožněno odstraňovat skořepinové formy i z těžko přístupných míst odlitku viz obr 46.



Obr. 46 Odstranění keramické skořepiny vysokotlakým paprskem vody [20]



Obr. 47 Hrubé odstranění keramiky [7]

6.2 Oddělování odlitků od vtokového systému [7], [19]

Oddělení odlitků od vtokové soustavy následuje po odstranění keramické skořepiny. K odřezávání se používají kotoučové nebo rozbrušovací pily oddělovat se mohou také plamenem a laserem. V současnosti se nejvíce využívají robotizované zařízení viz obrázek číslo 47.



Obr. 48 Odřezávání jednotlivých modelů [19]

6.3 Odstranění zbylé keramiky [7], [11], [18], [19]

Po odstranění vtokové soustavy, dochází k odstranění zbylé keramiky. Využívají se tři způsoby, odstranění chemickou, abrazivní a neabrazivní. Chemická metoda se využívá jen zřídka, kvůli cenové náročnosti. Nejvíce se využívají abrazivní metody, které se dělí na tlakové tryskání a tryskání bez použití vzduchu.

6.3.1 Abrazivní metody

Tlakové tryskání vodním paprskem

Jako médium je využit vysokotlaký vodní paprsek. Dělíme je na otevřené a uzavřené. Otevřené jsou využívány častěji k odstranění větších částí skořepin. Uzavřené se provádí v uzavřené komoře, kde vodní paprsek odlitky dokonale očistí od keramiky. Výhodou je, že nevzniká žádný prach.

Tlakové tryskání vzduchu

Jako médium je využíván stlačený vzduch, který vrhá abrazivní brusivo na odlitek. Jako brusivo jsou použity ocelové broky, litinová drť a další. Proces probíhá v uzavřené komoře. Z důvodu prašnosti je nutné box odvětrávat.



Obr. 49 Tryskáč kabina [7]

Tryskání bez použití vzduchu

Abrazivní částice (ocelové broky) jsou vrhány na odlitky pomocí lopatkového kola

6.3.2 Chemické metody

Lázeň s rozpuštěnou solí

Odlitek je uložen v solné lázni po dobu 20 minut a poté opláchnut a ponořen do neutralizačního roztoku.

Horká vodní žíravá lázeň

V lázni je hydroxid sodný o teplotě 80 °C. Odlitky jsou v lázni namočeny několik hodin, aby keramika byla dokonale odstraněna. Po vyjmutí z lázně, jsou odlitky opláchnuty horkou vodou a pak sušeny.

6.3.3 Neabrazivní metoda

Čištění suchým ledem, také známé jako tryskání suchým ledem, je revoluční metodou čištění, která používá pelety suchého ledu (CO₂ v pevné formě) jako trhací média. Výsledkem je zcela suchá, neabrazivní čistící metoda bez druhotného odpadu. Čištění suchým ledem je třístupňový proces.

a) Kinetický efekt- pelety suchého ledu se zrychlují stlačeným vzduchem na vysoké rychlosti, což ovlivňuje vrstvu a způsobuje zlomeniny.

b) Tepelný efekt- nízká teplota (-79°C / -110°F) způsobuje, že povlak je křehký, popraskaný a uvolněný. Toto umožňuje suchému ledu proniknout povlakem.

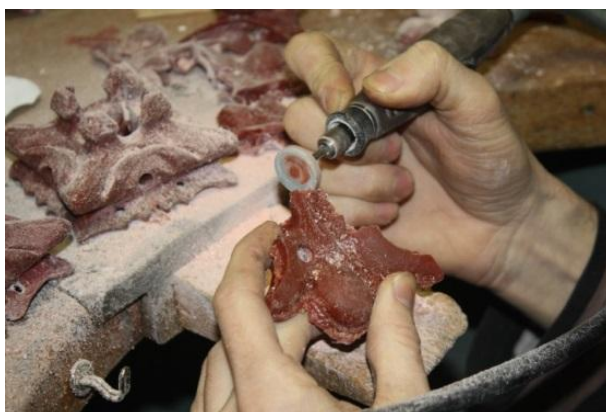
c) Sublimace- suchý led přechází z pevné látky na plynnou formu a tak zvedá povlak z povrchu.



Obr. 50 Princip čištění suchým ledem [11]

6.4 Dokončující operace [3], [7], [16], [19]

K odstraňování povrchových vad, skvrn a vtoků z odlitků se používá broušení a leštění. K odstranění se používají různé brousící zařízení a můžeme je dělit i na ruční a strojní broušení. Strojní broušení může být prováděno i za pomoci robotizovaných brousících zařízení s přesností $\pm 0,1$ mm. Robotový systém využívá jedinečnou mechanickou charakteristiku, která zajišťuje nejvyšší přesnost i za extrémních řezných podmínek. Volitelné moduly přinášejí rychlou výměnu nástrojů. Mezi dokončující operace se někdy řadí i obrábění i tepelné zpracování.



Obr.51 Ruční broušení [7]



Obr.52 Strojní broušení [19]

6.5 Kontrola odlitků [2], [4]

Technologií přesného lití se vyrábí velmi přesné odlitky, a proto je důležité provádět kontrolu.

6.5.1 Vizuální kontrola

Provádí se pouhým okem, lupou nebo pomocí endoskopů, proto je nenáročná a levná

6.5.2 Kapilární defektoskopie

Tato metoda se používá k odhalení povrchových trhlin a nečistosti. Kapalina je nanášena na odlitek a ta se zachytí v trhlinách a to určí defekty.



Obr. 53 Princip kapilární defektoskopie [7]

6.5.3 Měření spektrometrem

Jedná se o analýzu chemického složení. Zařízení funguje na principu zachycování záření fotocitlivým snímačem a ten vyhodnotí obsah prvků v odlitku.

6.5.4 Rentgen

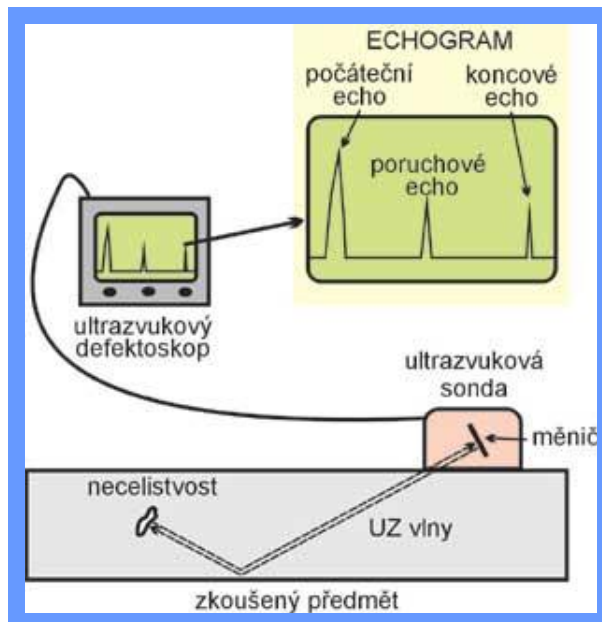
Jedná se o nedestruktivní metodu, která je založena na prozařování materiálu ionizovaným zářením.



Obr. 54 Kontrola rentgenem [16]

6.5.5 Ultrazvuk

Je to nedestruktivní metoda založená na změnách propustnosti a odrazech vln kvůli necelistvosti materiálu.



Obr. 55 Princip kontroly ultrazvukem [7]

6.5.6 Metalografie

Pomocí metalografie se zviditelní struktura materiálu, kterou následuje studování pomocí mikroskopu. Je to destruktivní defektoskopická metoda.

6.5.7 Metoda pro rozměrovou kontrolu

U odlitek je důležité dodržování rozměrů. Kontrolování přesností těchto rozměrů se provádí pomocí ručních nebo automatických měřidel. Mohou to být mikrometry, souřadnicové měřicí systémy a další.



Obr. 56 Rozměrová kontrola [16]

Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vypracovat literární rešerši na téma technologie vytavitelného modelu v současnosti, se zaměřením na nejmodernější zařízení používané v technologii vytavitelného modelu v současnosti, se zaměřením na výrobu voskového modelu, keramické skořepiny, vytavování vosku a tepelné zpracování keramické formy před odlitím.

Technologie vytavitelného modelu je jedním nejprogresivnějších způsobů lití. Odlitky dosahují velmi vysoké přesnosti rozměrů. Pro lití se využívá široká škála odlévaných slitin. U odlitků je snaha dosažení takové kvality, aby nebylo nutné potřeba užití dokončujících operací. Využití mají v mnoha průmyslových odvětvích, jako jsou letecký průmysl, energetika, zdravotnictví a další.

V současnosti se nejvíce dbá na modernizaci a automatizaci sléváren, které tuto technologii využívají i přes dlouhý vývoj a modernizování jednotlivých etap je stále co zdokonalovat. Snaží se dosáhnout, co nejkratších výrobních časů, zamezit vzniku vad odlitků, snížit výrobní náklady, snížit dopad na životní prostředí a snaží se využít co nejvíce materiálu k recyklaci. Toto vede k větším ziskům a k zvýšení produktivity sléváren.

Seznam zdrojů

- [1] BEELEY, Peter R. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 09-017-1666-9.
- [2] HORÁČEK, Milan. Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu: Dimensional accuracy of investment castings : zkrácená verze habilitační práce. FSI VUT Brno 2009. Brno: VUTIUM, 2004. ISBN 80-214-2558-X.
- [3] SOUKUPOVÁ, Lucie. Technologie vytavitelného modelu v současnosti. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [4] Metrocast Italiana. *Metrocast Italiana* [online]. Brescia: Metrocast Italiana SpA, 2006 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.metrocast.it/inglese/history.html>
- [5] TALANDA, Ivan. *Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc
- [6] *Investment Casting WAX: Westechwax: Casting Waxes* [online]. California: Wastech, 2014 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/investment-casting-wax>
- [7] HORÁČEK, Milan. *VÝROBA PŘESNÝCH ODLITKŮ TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU: [přednáška]*. VUT, FSI, Odbor slévárenství. Brno, 2015..
- [8] *MPI Systems* [online]. Poughkeepsie, NY: MPI, 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.mpi-systems.com/>
- [9] PHIPPS, Bruce. *Automation, The Why and How: [prezentace]*. MPI Systems. Lugano, 2014.
- [10] ŠTIPL, Pavel. *Současné trendy ve výrobě skořepinových forem*. Brno, 2012. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.
- [11] *SHELL-O-MATIC* [online]. Montreal: SHELL-O-MATIC, 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://shellomatic.com/>
- [12] *Kdynium* [online]. Kdyně: Kdynium.cz, 2015 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.kdynium.cz/start.aspx>
- [13] *Advanced Technology Shell Manufacturing Systems: [prezentace]*. VA Technology. Cleveland, 2014.
- [14] *MK Technology* [online]. Grafschaft near Bonn: MK Technology, 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.mk-technology.com/>
- [15] *VA Technology* [online]. Cleveland: VA Technology, 2014 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.vatech.co.uk/index.php>

[16] KOTRA, Csongor. *Technologie odlévání kovů metodou přesného lití na vytavitelný model*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Filípek, CSc.

[17] *LBBC Technologies* [online]. West Yorkshire: Spotlight Studios, 2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://lbbctechnologies.com/product/boilerclave/>

[18] PICKARD, Howard. *Wax and Core Removal: [prezentace]*.LBBC. Lugano, 2014.

[19] *Advanced Finishing Technology Precision Cutting & Grinding: [prezentace]*. VA Technology. Lugano, 2014.

[20] *URACA* [online]. Bad Ur--ach: UR-A---CA GmbH & Co., 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.uraca.com/markets/applications/casting-core-removal.html>

Seznam obrázků

- Obr. 1 Odlitky [10]
- Obr. 2 Odlitek hřebenu ze zlata [11]
- Obr. 3 Princip technologie vytavitelného modelu [12]
- Obr. 4 Kovová matečná forma [13]
- Obr. 5 Princip výroby formy ze sádry [13]
- Obr. 6 Princip výroby formy z nízkotavitelných slitin [14]
- Obr. 7 Princip výroby formy vyrobené galvanoplasticky [14]
- Obr. 8 Princip výroby formy metalizováním [15]
- Obr. 9 Vstřikovací automat [15]
- Obr. 10 Popis vstřikovacího stroje [16]
- Obr. 11 Princip vstřikování vosku do formy [16]
- Obr. 12 Sestava jediného modelu [17]
- Obr. 13 Sestavování modelu do stromečku [18]
- Obr. 14 Modely sestavené horizontálně [18]
- Obr. 15 Modely připevněny na vtokový kůl [19]
- Obr. 16 Model 20-14 [19]
- Obr. 17 Princip odmaštění [21]
- Obr. 18 Nádrž na obalovou hmotu [22]
- Obr. 19 Vozík s čerpadlem [22]
- Obr. 20 Namáčení stromečku pomocí robotického ramena [23]
- Obr. 21 Zařízení ke sprchovému posypávání [23]
- Obr. 22 Zařízení pro fluidní posypávání [23]
- Obr. 23 Ventilátory [24]
- Obr. 24 Booster [24]
- Obr. 25 Sušící linka [25]
- Obr. 26 Schéma linky s mikrovlnnými pecemi [26]
- Obr. 27 Mikrovlnná pec [26]
- Obr. 28 Dopravníky [26]
- Obr. 29 Vertikální dopravník [26]
- Obr. 30 Robotické rameno [27]
- Obr. 31 Automatizovaná linka [27]
- Obr. 32 Kontrolní systém linky [27]
- Obr. 33 Cyclona [28]
- Obr. 34 Dilatační spára [28]
- Obr. 35 Skořepina po vytavení [28]
- Obr. 36 Princip bojlerklávu [29]
- Obr. 37 Boilerclave [30]
- Obr. 38 Quicklock [30]
- Obr. 39 Proces žihání [30]
- Obr. 40 Žihací pec [31]
- Obr. 41 Odlévání [32]
- Obr. 42 Klasické lití [32]
- Obr. 43 Princip sklopného lití [33]
- Obr. 44 Gravitační lití ve vakuu [33]
- Obr. 45 Příklad vakuového nasávání [34]
- Obr. 46 Odstranění keramické skořepiny vysokotlakým paprskem [35]
- Obr. 47 Hrubé odstranění keramiky [35]
- Obr. 48 Odřezávání jednotlivých modelů [36]

- Obr. 49 Tryskací kabina [37]
- Obr. 50 Princip čištění suchým ledem [38]
- Obr. 51 Ruční broušení [39]
- Obr. 52 Strojní broušení [39]
- Obr. 53 Princip kapilární defektoskopie [40]
- Obr. 54 Kontrola rentgenem [40]
- Obr. 55 Princip kontroly ultrazvukem [41]
- Obr. 56 Rozměrová kontrola [41]