



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TRENDY VE VÝROBĚ VOSKOVÝCH MODELŮ U TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

TRENDS IN MANUFACTURING OF NON-PERMANENT WAX PATTERNS IN INVESTMENT CASTING
TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Halaška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Halaška**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Trendy ve výrobě voskových modelů u technologie vytavitelného modelu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární přehled nepoužívanějších voskových směsí a příslušných zařízení k výrobě náročných (tenkostěnných a rozměrných) odlitků

Cíle bakalářské práce:

Provedení literární rešerše zaměřené na nejmodernější zařízení a suroviny používané v technologii vytavitelného modelu se zaměřením na výrobu voskového modelu

Seznam literatury:

Beeley, PR., Smart, RF. (1995): Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 486 p. ISBN 0 901716 66 9.

Campbell, J. (1991): Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 288 p. ISBN 0 7506 1072.

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

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

Horáček, M., Cileček, J. (2007): Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets”, Foundry Trade Journal, U.K., Volume 180, Nr. 3641, pp.32-35

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje nejpoužívanější voskové směsi a zařízení k výrobě náročných odlitek. Práce obsahuje dvě hlavní kapitoly a to jsou voskové směsi a voskové modely. Cílem této bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na nejmodernější zařízení a suroviny používané v technologii vytavitelného modelu se zaměřením na výrobu voskového modelu.

Klíčová slova

slévárenství, přesné lití, vytavitelný model, vosk, vosková směs, model, rapid prototyping, odlitek, forma, vada

ABSTRACT

Bachelor's thesis describes the most used wax blends and equipment for manufactory of sophisticated castings. The thesis includes two major sections and these are wax blends and wax patterns. The aim of this thesis is to develop a literary review focused on the most advanced equipment and raw materials used in the investment casting technology with a focus on the manufactory of wax pattern.

Key words

foundry, investment casting, lost wax, wax, wax blend, pattern, rapid prototyping, casting, mold, defect

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HALAŠKA, Jan. *Trendy ve výrobě voskových modelů u technologie vytavitelného modelu*. Brno, 2016, 45 s. Bakalářská práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Trendy ve výrobě voskových modelů u technologie vytavitelného modelu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jan Halaška

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 Technologie vytavitelného modelu.....	9
1.1 Historie.....	9
1.2 Princip technologie vytavitelného modelu	9
2 Voskové směsi	11
2.1 Typy voskových směsí.....	11
2.2 Základní složky voskových směsí	13
2.3 Vlastnosti voskových směsí.....	15
2.4 Zkoušení voskových směsí	17
2.5 Regenerace a rekonstituce vosků	23
3 Voskové modely	26
3.1 Zařízení k výrobě voskových modelů.....	26
3.2 Rapid prototyping	30
3.3 Vady voskových modelů	31
3.4 Ukázky voskových modelů a konečných odlitků	37
ZÁVĚR	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	44
SEZNAM GRAFŮ	45

ÚVOD

Technologie vytavitelného modelu patří mezi moderní technologie přesného lití. Základní kameny této technologie byly položeny již několik tisíc let před naším letopočtem, kdy tehdejší umělci vyráběli odlitky na stejném principu jako současné slévárny (obrázek 1). Úkolem této technologie je zhotovit velmi přesné a rozměrově náročné odlitky. Kladením důrazu právě na přesnost odlitku lze dosáhnout vysoké jakosti povrchu, rozměrové přesnosti a složitých tvarů na odlitku. Díky těmto aspektům lze vytvořit odlitek „téměř na hotovo“ („near net shape“), kde již není potřeba tolik dokončujících operací jako u jiných technologií. Takový odlitek má poté lepší vlastnosti a je ekonomicky výhodnější v porovnání s jinou technologií.

Postup výroby odlitku technologií vytavitelného modelu se skládá z několika na sebe navzájem navazujících operací a právě správným zvládnutím těchto operací lze dosáhnout přesného odlitku. Výroba voskového modelu patří mezi první operace této technologie a je zde kladen vysoký nárok na správnost a přesnost modelu, jelikož budoucí odlitek bude mít stejné tvary jako voskový model. Vosková směs a její zpracování je proto velmi důležité.

Cílem této bakalářské práce je popsat voskové směsi k výrobě voskových modelů. Práce je zaměřená především na složení a zkoušení voskových směsí a výrobu voskových modelů.



Obr. 1 Odlitek z doby př. n. l. (vlevo) [1] a současnosti (vpravo) [2]

1 TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Charakteristickým znakem této technologie je velmi přesný odlitek, který lze zhotovit. Tato technologie nabízí výrobu odlitků s tenkými stěnami, ostrými detaily a velmi dobrou jakostí povrchu. [3]

1.1 Historie

Historie technologie vytavitelného modelu sahá až do roku 4000 př. n. l. Princip technologie byl stejný jako v dnešní době. Umělci tehdy využívali včelí vosk ke zhotovení voskového modelu, jenž byl následně obalen hlínou, vosk byl vytaven a do vzniklé skořepiny byl odlit bronzový odlitek (obrázek 2).

Během posledních 80 let došlo k vývoji této metody, jenž byla považována za vysoce speciální, na metodu běžnou a rozšířenou. Tomuto vývoji položila základy druhá světová válka a následný tlak ze strany leteckého a kosmického průmyslu na reprodukovatelnost, materiály, přesnost a náklady na odlitky urychlil tento vývoj. Historií zainteresované čtenáře této technologie bych odkázal na literární pramen [3], kde je dopodrobna popsána. [3], [4], [5]



*Obr. 2 Historický odlitek z mědi
cca 2000 let před naším letopočtem [5]*

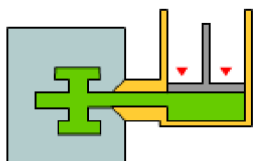
1.2 Princip technologie vytavitelného modelu

Výrobní proces se skládá z několika kroků, které je potřeba nutno dodržet, aby se dosáhlo přesného odlitku.

Proces začíná výrobou matečné formy, která je zhotovená z určitého materiálu. Pro velké série je forma zhotovena nejčastěji obráběním z kovu a pro menší série z gumy nebo silikonu. Následuje vytvoření voskového modelu, kdy je do formy vstříknut, nebo gravitačně nalit vosk. Po určitém čase je voskový model vytáhnut a forma musí být očištěna k dalšímu použití. Ustálené a opravené voskové modely jsou poté sestaveny do stromečku

a připraveny k obalování. Obalování se skládá z namáčení stroměčku do keramické břechky a následným posypem jemným pískem. Tato operace se se opakuje v závislosti na složitosti odlitku. K dosažení vysoké jakosti povrchu jsou zrna posypového písku v první vrstvě nejmenší a nejjemnější a postupně se zrna zvětšují. Následuje sušení obalu a po vysušení je v boilerklávu vytaven vosk. Zde musí dojít k teplotnímu šoku, který způsobí rychlý nárůst teploty a tlaku v boilerklávu. Teplotní šok má za následek natavení malé vrstvy vosku mezi modelem a obalem, a tak nedojde k popraskání skořepiny vlivem dilatace vosku. Vzniklá skořepina je dále žihána ke zlepšení mechanických vlastností, a aby nedošlo k prasknutí při odlévání kovu. Do připravené skořepiny je poté na vzduchu, nebo ve vakuu odlit kov. Následuje chladnutí odlitku a po vychladnutí odstranění skořepiny (vibračně nebo abrazivem), tak aby nedošlo k porušení odlitku. Získané odlitky jsou poté odřezány od vtokového systému a předány ke kontrole rozměrů a jakosti povrchu. Celý výrobní proces je zobrazen na obrázku 3. [3], [4], [6]

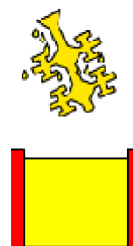
A) Výroba modelu



B) Sestavení stroměčku



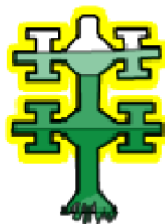
C) Namáčení do keramické břechky



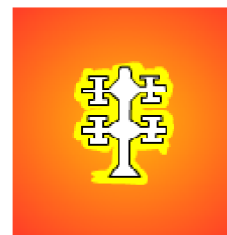
D) Posyp keramikou



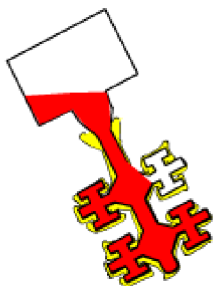
E) Vytavení vosku



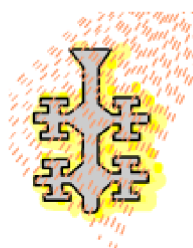
F) Žihání skořepiny



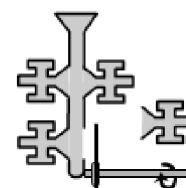
G) Odlévání



H) Odstranění skořepiny



CH) Odřezání odlitků od vtokového systému



Obr. 3 Princip technologie vytavitelného modelu [7]

2 VOSKOVÉ SMĚSI

Vosk je nejstarší termoplastický materiál, jaký je lidstvu znám. Jelikož ho lze v jeho tekutém, polotekutém nebo plastickém stavu dobře odlévat nebo formovat, je jeho historie spojená s vývojem umění, řemesel a průmyslu. V dnešní době se v průmyslu přesného lití pojem vosk vztahuje na každou látku, která má vlastnosti jako vosk.

Moderní směsi vosků pro přesné lití jsou složité sloučeniny skládající se z několika pečlivě vybraných složek, jako jsou uhlovodíkové vosky, přírodní esterové vosky, syntetické vosky, přírodní a syntetická pryskyřice, organické plniva a voda. Kombinací těchto složek a jejich různého procentuálního složení lze docílit různým a určitým požadavků pro potřebný vosk. [8], [9]

2.1 Typy voskových směsí

Ke snadnému rozlišení voskových směsí se rozlišují dle jejich použití:

A) Modelové vosky

Slouží primárně k výrobě voskových modelů. Značí se výbornými vlastnostmi, a jestliže jsou vyrobeny z nových surovin, označují se jako panenské modelové vosky. Většina těchto vosků se dá recyklovat a lze je vstříkovat na všech typech vstříkolisů. [8]

- Přímé (neplněné)

Tyto typy vosků se odjakživa používají pro výrobu modelů. Díky svým vlastnostem mohou být vstříkovány na všech typech vstříkolisů v širokém rozsahu teplot. Lze je snad recyklovat. Další výhodou je vynikající kvalita povrchu modelu a také nízký obsah popela. Při tavení vosku se musí předejít přehřátí. Maximální teplota tavení je 120 °C. Modely mohou trpět propadlinami, čemuž jde zabránit chlazením. Model musí být z matečné formy vytahován opatrně, aby se zamezilo jeho poškození a následně by měl být 24 hodin ustaven do klidu. [8], [10]

- Emulsifikované

Složením a vlastnostmi jsou podobné voskům přímým (neplněným) s tím rozdílem, že plnivo zde tvoří voda v obsahu 7 – 12 %. Modely jsou zhotovovány na tzv. plničkách. Voda jako plnivo zde redukuje vznik propadlin a povrch modelu je extrémně hladký. Další výhodou je vysoká rozměrová stabilita modelů. Teplota tavení vosku by neměla přesáhnout 95 °C. Tyto vosky se začaly používat díky jejich všestrannosti a jednoduchou recyklací. [8], [10]

- Plněné

Plněné voskové směsi jsou nepoužívanější směsi při výrobě složitých modelů např. tenkostěnné modely. Základní složky jsou podobné jako u předchozích typů

voskových směsí s rozdílem, že je zde přidáno práškové inertní plnivo, které je nerozpustné v základním vosku a způsobuje zvýšení rozměrové stability a snížení tvorby propadlin. Díky jejich složení se ve slévárnách nazývají jako vosky tvrdé. Je nezbytné, aby organické plnivo bylo zcela vypáleno a obsah popela tak zůstal na minimální hranici. Části plniva musí být velmi malé a jemné, aby nedošlo ke zhrubnutí povrchu modelu. Aby nedošlo k oddělení plniva od základního vosku v tekutém stavu, musí se pro plniva používat materiály s hustotou podobnou základnímu vosku. Zpracovávat je lze v tekutém, polotekutém nebo pastovitém stavu a to na všech typech vstřikolisů. Maximální teplota tavení vosku je 120 °C a nemělo by dojít k přehřátí. [8], [10]

B) Vtokové vosky

Slouží k výrobě vtokové soustavy a mají téměř stejné složení jako vosky přímé. Mohou být neplněné nebo s malým procentem plniva ke zvýšení pevnosti, aby nedošlo k následnému prasknutí pod tíhou modelu. Teplota tavení musí být menší než teplota tavení modelového vosku, aby došlo prvně k vytavení vtokového vosku a následně k vytavení modelového vosku a jeho bezproblémového odtékání ze skořepiny. [6], [11]

C) Vodou rozpustné vosky

Tyto vosky se používají k výrobě vyplavitelných jader. Jádru je umístěno do formy a kolem něho je poté vstříknut modelový vosk. Mají dobré vstříkovací vlastnosti, povrch, malý sklon k propadání a dobrou rozměrovou stabilitu. Díky jejich složení je lze lehce vyplavit z modelů. Chemickým složením se rozpustné vosky liší od modelových či vtokových vosků. Není zde obsažen žádný parafin, mikrokrytalický vosk nebo přírodní či syntetická pryskyřice. Nejčastěji jsou složeny z kombinace různých polyethylenových glykolů, šumivých katalyzátorů a aditiv (ztužovadla, změkčovadla). Nejčastějšími katalyzátory jsou uhličitany, které způsobují rychlejší rozpuštění jádra. Některá aditiva obsahují vlákna, která dodávají vosku sílu a tvrdost potřebnou k dobrému povrchu jádra. Vstříkovací teplota se pohybuje okolo 60°C.

Rozpustné vosky měly až do nedávné doby mezi slévárnami špatnou pověst kvůli problémům spojených s jejich použitím. Nízká tekutost po roztavení, abrazivní chování během vstřikování a manipulování, nízká kvalita povrchu a možné zdravotní a bezpečnostní problémy během jejich vyplavování. Toto vše vedlo k jejich lepšímu prozkoumání a přidání různých složek a aditiv, které dodaly těmto voskům požadované vlastnosti. [12], [13]

D) Speciální vosky [14], [15]

Jedná se o neplněné voskové směsi. Používají se především k dokončování a opravování voskových modelů.

- **Namáčecí**

Určeny pro utěšňování škvír a spár. Mají nízkou viskozitu, což zaručuje dobré zatečení do požadovaných otvorů.

- **Vosky na opravy**

Dělí se na měkké a tvrdé. Určeny k opravování poškozených modelů a utěsnění vtokových soustav.

- **Adhézní (vosky na lepení)**

Jsou vosky, které se používají ke slepování modelů a přilepování modelů do stromečku ke vtokové soustavě. Vyznačují se vysokou adhezí.

E) Regenerované a rekonstituované vosky

Během procesu přesného lití dochází ke znehodnocování voskových směsí. Aby bylo možné tyto vosky znovu použít, musí projít procesem, který zaručí znovuobnovení jejich vlastností.

- Regenerované vosky se nejčastěji používají pro výrobu vtokových soustav. Jestliže ve vosku zůstane část plniva, jsou vlastnosti lepší než originálního vosku na vtoky. [16]
- Rekonstituované vosky se používají na výrobu vtoků a modelů. Do vosku jsou přidány nové složky a rekonstituovaný vosk má poté chemické složení, obsah popela a rozměrovou přesnost téměř totožnou s voskem panenským. [17]

2.2 Základní složky voskových směsí [18], [19], [20]

Parafín – petrochemický produkt. Vyznačuje se svou křehkostí a nízkou pevností. Patří mezi složky při výrobě měkkých vosků a je vhodný pro výrobu modelů gravitačně nebo na plničkách. Jeho struktura je tvořena z krátkých rovných řetězců molekul uhlovodíku o délce 20 – 36 atomů uhlíku. Při teplotě nad 30 °C začíná měknout a při teplotě okolo 65 °C se začíná tavit. Obsah popela může být až 0,1%, závisí na jakosti. Tvrdost se pohybuje mezi 12 – 25 mm·0,1.

Mikrokrystalický vosk – petrochemický produkt. Má vyšší pevnost a ohebnost než parafín. Struktura je tvořena mikrokristaly, které jsou jemnější než u parafínu a dále je jeho struktura tvořena rozvětvenými řetězci uhlovodíků o velikosti 31 – 50 atomů uhlíku. Teplota tavení je až mezi 60 – 93°C. Jeho tvrdost se pohybuje v rozmezí 2 – 75 mm·0,1.

Pryskyřice – struktura je tvořena složitými přímými, rozvětvenými a kruhovými řetězci. Přidáním pryskyřice do voskové směsi se výrazně zlepší její tekutost. Pryskyřice by měla být inertní, aby nedocházelo k její degradaci oxidací. Rozděluje se na 3 typy, kde každý typ má své zvláštní výhody.

- Uhlovodíková

Petrochemický produkt. Bod měknutí se pohybuje mezi 18 – 176 °C. Mohou být hydrogenové, monomerové nebo aromatické pryskyřice.

- Syntetická

Organická sloučenina. Bod měknutí se pohybuje mezi 25 – 190 °C. Mohou být modifikované, esterové nebo polymerové pryskyřice.

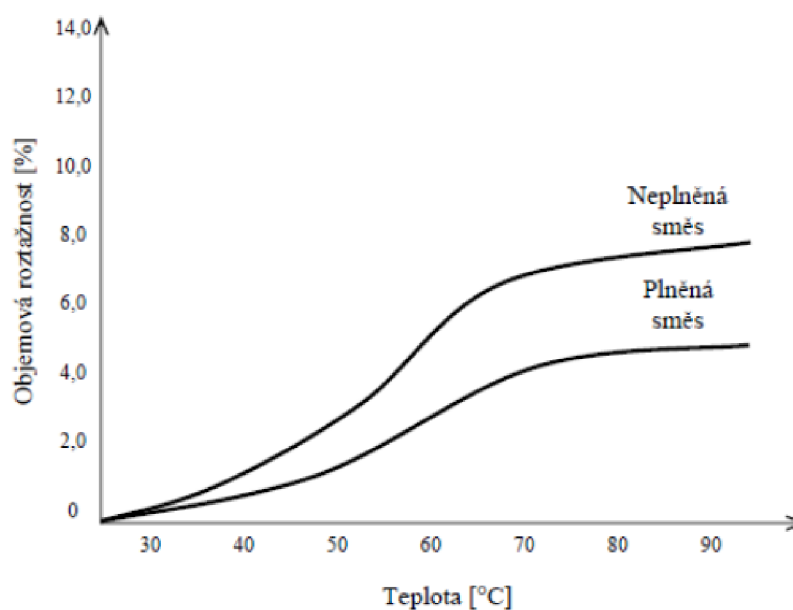
- Přírodní

Složité směs organických sloučenin. Bod měknutí se pohybuje mezi 80 – 180 °C. Mohou být modifikované, hydrogenesterové, polyesterové pryskyřice.

Tvrde vosky – mohou být přírodní estery nebo modifikované uhlovodíkové směsi. Jsou křehké a mají nízkou viskozitu. Bod tuhnutí se pohybuje v rozmezí 65 – 120 °C. Tvrdost je nižší než 1 mm·0,1.

Polymery – nejčastěji používaný je etylén vinyl acetát (EVA). Další mohou být různé polymerové směsi. Jsou to inertní složky ve voskových směsích a zvyšují houževnatost, viskozita a další fyzikální vlastnosti. Teplota tavení se pohybuje mezi 50 – 200 °C a tvrdost mezi 5 – 50 mm·0,1.

Plniva – jsou materiály přidávané do voskových směsí za účelem omezit nebo limitovat nežádoucí účinky spojené s přímými (neplněnými) vosky. Zejména pak zlepšuje rozměrovou stálost, konečný povrch modelu, mechanické vlastnosti a také možnost prasknutí skořepiny při vytavování vosku. Vliv plniv na roztažnost vosků lze vidět v grafu 1.



Graf 1 Vliv plniv na roztažnost voskových směsí [21]

Základní kritéria správného plniva by měly být [21]:

- materiál by měl být inertní k základnímu vosku a nejlépe tepelně stabilní
- obsah popela co nejnižší, aby po vytavení a vyžihání nezůstaly ve skořepině žádné nežádoucí materiály
- podobnou hustotu k roztavenému vosku z důvodu omezení usazování
- plnivo by nemělo ovlivnit konečný povrch vystříknutých modelů. Jestliže je plnivo v pevném skupenství, částičky nesmí být příliš velké a hrubé.
- při používání bezpečné pro pracovníky a také pro životní prostředí

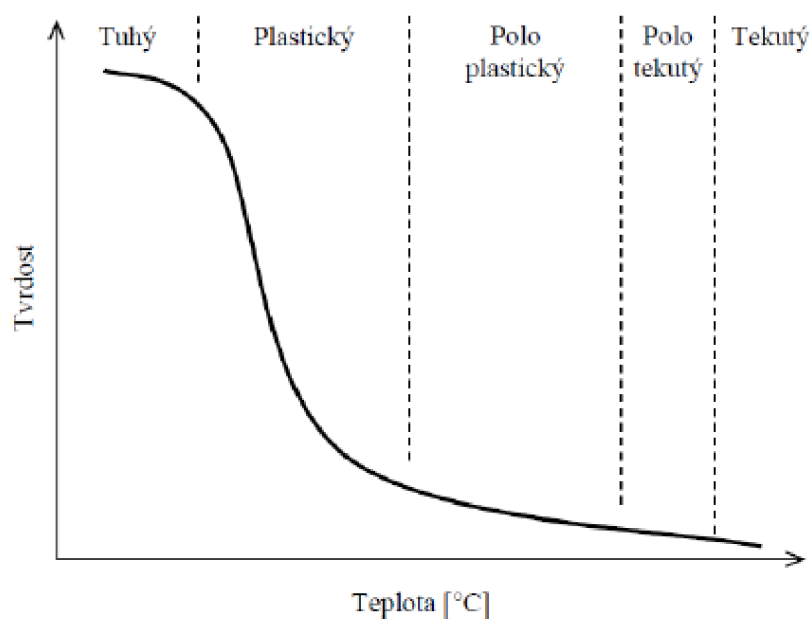
Během několika let bylo vyzkoušeno mnoho materiálů jako plniva. Nicméně ne všechny měly ty správné vlastnosti pro použití. V dnešní době se v běžném provozu používají tyto materiály [20]:

- Bisphenol A (BPA) – organická sloučenina s dvěma fenolickými skupinami. Byl objeven v roce 1950 a používá se především ve spotřebním průmyslu. BPA se používá ve slévárnách, které chtějí provádět recyklaci přímo ve slévárně. Vosková směs s BPA je velmi tekutá a lze ji vstříkovat při nízkých teplotách. Při teplotě nad 100 °C se usazuje. Používání BPA je v dnešní době v některých zemích zakázáno z důvodu jeho zdravotní závadnosti. [20]
- Zesítěný polystyren (XLPS) – tepelně stabilní organické plnivo. Používá se ve slévárnách po celém světě díky jeho vynikajícím vlastnostem. Voskové směsi lze dobře recyklovat. Hustota XLPS je 1,07 g·cm⁻³. Jeho výhodou je rozměrová stálost a nízké usazování, nevýhodou je vysoká cena. [20]
- Voda – široce používaná jako plniva zejména v emulzifikovaných voscích. Snižuje tvorbu propadlin a zjemňuje povrch modelu. Proces tavení voskové směsi s vodou musí být kontrolován, aby nedošlo k vypaření vody a k následné tvorbě vad na modelu. Výhodou je snadná recyklace a také nízké náklady. [20]
- Kyselá plniva – dvě nejčastěji používané kyseliny jsou tereftalová a isoftalová. Kvůli jejich hustotě okolo 1,7 g·cm⁻³ se musí směs neustále promíchávat, aby nedošlo k usazení. Jsou používány samostatně nebo v kombinaci s XLPS. Voskové modely z této směsi mají dobrý povrch. Lze je recyklovat a cena je nižší než u XLPS. [20]

2.3 Vlastnosti voskových směsí

Moderní voskové směsi se skládají z mnoha složitých sloučenin. Jednotlivé sloučeniny ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti směsi jako např. bod tání, tvrdost, viskozitu nebo objemové změny. Tyto změny jsou způsobeny rozdílnou atomární strukturou jednotlivých

složek. Uhlovodíkové vosky, syntetické vosky nebo pryskyřice mají rovnou řetězovitou strukturu uhlíkových atomů. Vyskytují se ovšem i pryskyřice a plniva, které mají strukturu kruhovitou. Obecně platí, že složky s krátkými řetězci mají nízký bod tání a nižší tvrdost. S rostoucí délkou řetězců se tvrdost, bod tání nebo bod tuhnutí zvyšuje. Kombinací právě těchto složek s rozdílnou atomární stavbou lze dosáhnout požadovaných vlastností. Například změna tvrdosti vosku se zvyšující se teplotou znázorňuje graf 2. [17]



Graf 2 Změna tvrdosti voskové směsi v závislosti na teplotě [21]

Ideální vosková směs by měla mít tyto vlastnosti [21]:

- Co nejmenší roztažnost při ohřevu a zároveň minimální smrštění při chladnutí.
- Při tuhnutí ve formě by měla získat dostatečnou pevnost a tvrdost, aby nebyla příliš křehká a nedošlo k porušení modelu při dalším technologickém zpracování.
- Povrch by měl být čistý a hladký, směs by měla co nejpřesněji kopírovat stěnu formy a neměla by se na ni lepit.
- Měla by být co nejlehčí, aby nedocházelo k poškození vlivem vlastní váhy.
- Nesmí chemicky reagovat s materiálem keramické břečky a musí odolávat oxidaci.
- Vystříknutý model by měl mít dobrou smáčivost s keramickou břečkou, aby mohlo dojít k bezproblémovému obalení.
- Tuhnutí v matečné formě by mělo být co nejkratší.

- Obsah popela by měl být minimální. Pozůstatky z modelu, které zůstanou ve skořepině, se poté projeví na odlitku.
- Struktura by měla být izomorfní.
- Směs by měla být maximálně recyklovatelná a také zdravotně nezávadná.

2.4 Zkoušení voskových směsí

Zkoušení voskových směsí se dělí na základní (klasické) zkoušky a pokročilé (speciální) zkoušky. Většina základních zkoušek byla převzata z petrochemického průmyslu a dříve sloužila především k zaručení kvality voskových směsí. Mezi tyto zkoušky patří zkoušky doporučené výrobcí a dále asociací BICTA – Britská obchodní asociace pro přesné lití [3], [22]:

- bod tuhnutí
- bod skápnutí
- obsah popela
- penetrace
- viskozita

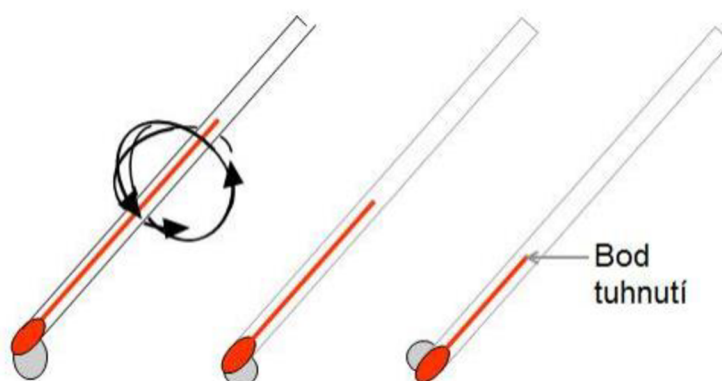
V dnešní době se začaly provádět pokročilé testy, které mají odhalit chování jednotlivých voskových směsí během celého procesu této technologie. Mezi tyto testy patří [22], [23]:

- reometrie
- mechanické vlastnosti
- DSC – diferenční skenovací kalorimetrie
- rozměrová analýza
- objemová roztažnost
- zabíhavost

A. Bod tuhnutí

Bod tuhnutí je teplota, kdy roztavený vosk přestává téct pod vlivem gravitace. Zjednodušeně lze říci, že je to teplota, při které vosk mění své skupenství na plastické. Výsledkem této zkoušky je teplota vosku, která je důležitá pro nastavení vstřikovacího zařízení pro dosažení nejlepších podmínek pro vstřikování. Na obrázku 4 lze vidět princip této zkoušky. Na špičce přehřátého teploměru je umístěna kapka roztaveného vosku. Teploměrem je následně

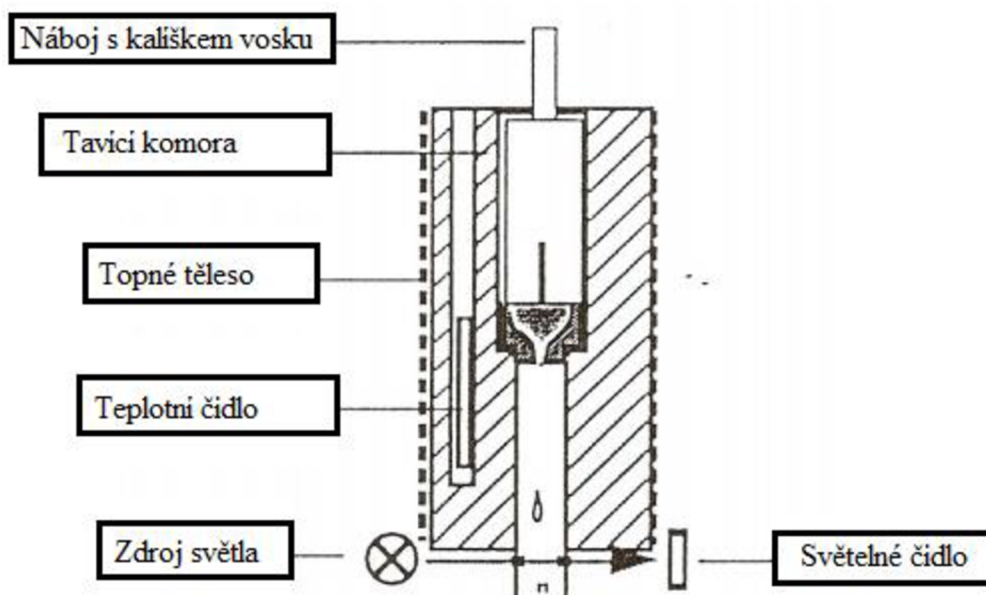
otáčeno a kapka vlivem gravitace klouže po teploměru. Jakmile kapka přestane klouzat po teploměru, nastává bod tuhnutí. [3], [19], [22], [23]



Obr. 4 Princip zjišťování bodu tuhnutí [24]

B. Bod skápnutí

Bod skápnutí je definován jako teplota, při které se začne vosk tavit neboli měnit své skupenství na kapalné. Tato teplota je důležitá především při vytavování vosku ze skořepiny. Na obrázku 5 lze vidět princip této metody. Vosk v kališku je zahříván pomalu se začíná tavit. Jakmile se první natavená kapka oddělí od zbytku vosku a propadne skrze světelný zdroj, je odečtena pomocí čidla teplota. [19], [23]



Obr. 5 Princip měření bodu skápnutí [24]

C. Obsah popela

Reprezentuje procentuální zastoupení nespalitelných látek obsažených ve voskové směsi. Obsah popela se určuje výpočtem z váhy voskového vzorku před spálením a po spálení ve speciální peci. Maximální hodnota popela u vosků pro přesné lití byla stanovena asociací BICTA a je 0,05%. Vysoké množství popela ve vosku by zapříčinilo defekty na povrchu nebo tvorbě bublin u výsledného odlitku. [3], [19], [23]

D. Penetrace

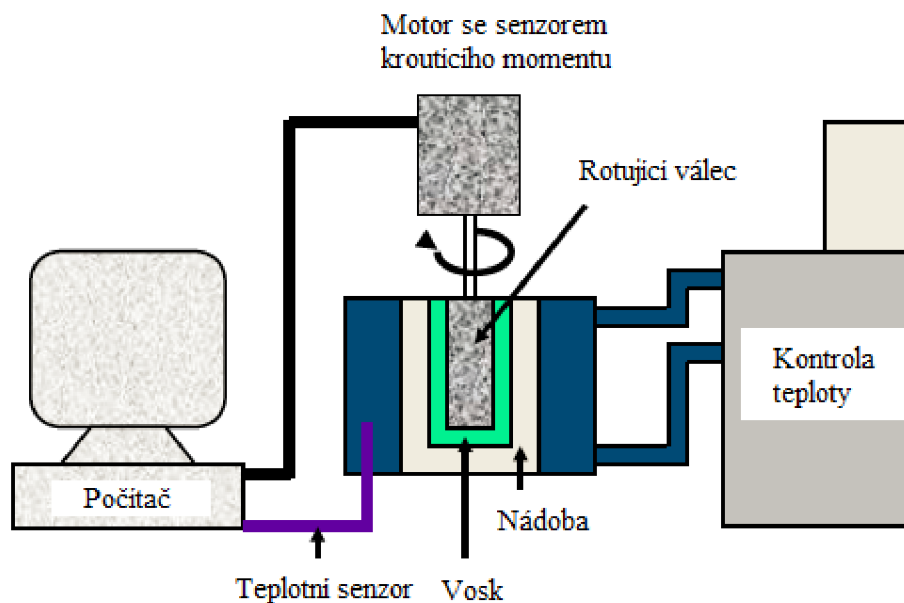
Penetrace nám udává tvrdost vosku. Je definována vzdálenost v desetinách milimetru, kterou vertikálně pronikne standardizovaná penetrační jehla do vzorku vosku při určité teplotě, velikosti zatížení a za určitý čas. Čím je penetrace menší, tím je vosk tvrdší. Měření probíhá na penetrometrech (obrázek 6). [3], [19], [23]



Obr. 6 Penetrometr [23]

E. Viskozita

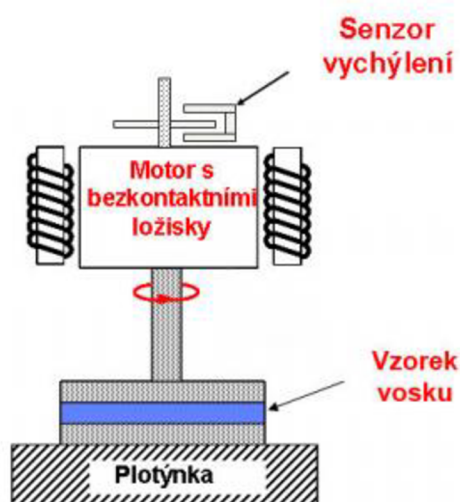
Viskozita udává schopnost tečení vosku. Dále je mírou toho, jak se kapalina brání tečení, tzn. zdali je vosk „hustý“ nebo „řidký“. Výsledkem testu viskozity je skutečnost, jak se bude vosk chovat při vstřikování a vytavování. Na obrázku 7 je znázorněn princip testu. Zahřátý vosk se nalije do nádoby a nechá se ustálit. Nádoba se poté začne s určitými otáčkami otáčet a vosk a je postupně ochlazován. Senzor krouticího momentu zpracovává, jakou sílu musí motor vyvíjet, aby byly udrženy stále konstantní otáčky během ochlazování vosku. Počítač poté ze shromážděných dat vypočte výslednou viskozitu vosku. [19], [23]



Obr. 7 Schéma měření viskozity vosku [23]

F. Reometrie

Ukazuje, jak vosk teče během všech jeho fází od kapalného po pevné skupenství. Zkouška je podobná zkoušce viskozity vosku, ale liší se teplotou zkoušeného vosku. Měření probíhá na reometrech a bývá používáno především pro porovnání průběhu tuhnutí voskových směsí mezi sebou. Schéma přístroje je na obrázku 8. [22], [25]



Obr. 8 Schéma reometru s kontrolovaným smykovým napětím [25]

G. Mechanické vlastnosti

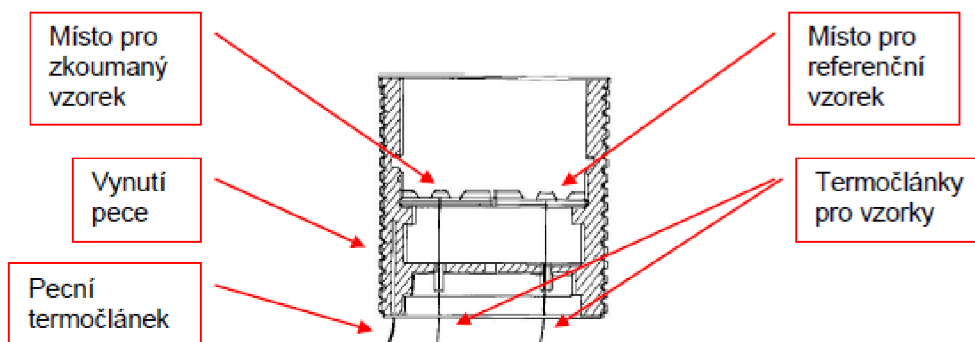
Jelikož se vosk řadí mezi křehké materiály, zkouška mechanických vlastností se provádí většinou při statické zkoušce na trojbodový ohyb. Mechanické vlastnosti vosku je dobré vědět především pro manipulaci s voskovým modelem (vyjímání z matečné formy, sestavování stromečku, obalování). Dále potom k nastavení vstřikolisu. Na obrázku 9 je znázorněna forma se zkušebními tyčinkami, které jsou vyráběny ručně nebo na vstřikolisu. Poté jsou před testem temperovány. Zkušební tyčinka je potom umístěna do zkušebního zařízení, kde program provede zatížení vzorku. Proces je zastaven, jakmile program zachytí zlomení vzorku, anebo dosáhne předepsané maximální hodnoty průhybu. [23], [25], [26]



Obr. 9 Forma na zkušební tyčinky [25]

H. DSC – diferenční skenovací kalorimetrie

Technika, která umožňuje získat teplotní vlastnosti voskových směsí během procesu tavení. Lze zjistit bod tavení voskové směsi nebo jednotlivých složek voskové směsi. Měřená veličina je latentní teplo. Princip spočívá v měření rozdílu teplot zkoumaného vzorku a referenčního vzorku a je znázorněn na obrázku 10. [22], [25]



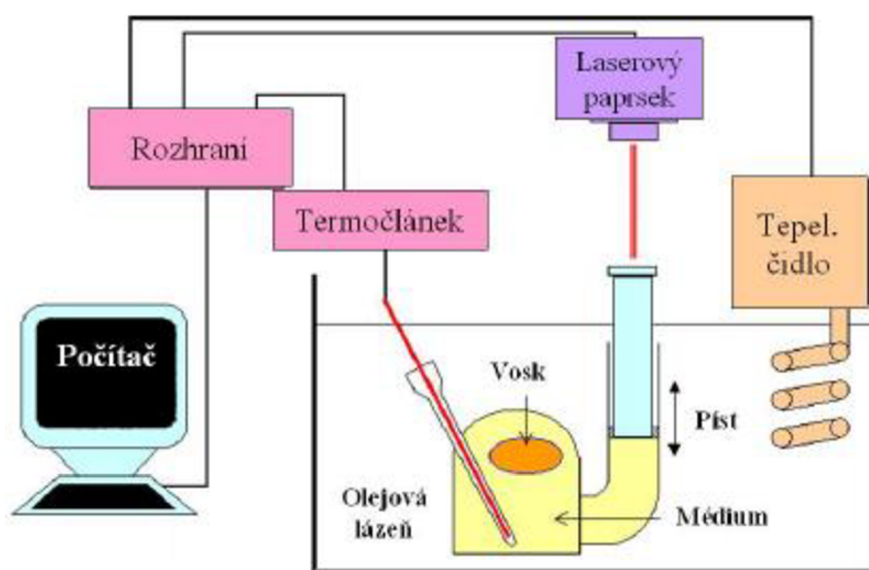
Obr. 10 Schéma komory diferenčního skenovacího kalorimetru [25]

I. TMA – teplotní mechanická analýza

Dělí se na zjištění smrštění dané voskové směsi a na objemovou roztažnost daného vosku během zahřívání. [22]

Smrštění: ideální by byla hmota, která by měla minimální smrštění. Smrštění ovlivňuje složení voskové směsi (zejména obsah plniva), vstřikovací parametry a tvar voskového modelu. Měření spočívá v porovnání rozměru matečné formy a výsledného voskového modelu. Následně je vypočteno procentuální smrštění. [25]

Objemová roztažnost: důležitá vlastnost především při vytavování vosku ze skořepiny a zabránění prasknutí skořepiny. Prasknutí skořepiny je důsledkem rozdílné objemové roztažnosti vosku a materiálu skořepiny. Měření probíhá v zařízení, jehož hlavní částí je dilatometr. Zde je umístěn vzorek a následně zaplaven glycerinem. Tlak vyvolaný změnou objemu je zaznamenán laserovým snímačem a počítačem převeden na změnu objemu. Princip měření je na obrázku 11. [25]



Obr. 11 Schéma zařízení na měření objemové roztažnosti vosku [25]

J. Zabíhavost

Touto zkouškou se zjišťuje schopnost proudění voskové směsi v matečné formě. Používá se pro to speciální forma se spirálovitou dutinou, kde jsou značky ukazující vzdálenost, jak daleko vosk zaběhl. Do formy je za známých parametrů (plnicí tlak, teplota formy a vosku) několikrát vstříknut roztavený vosk a průměrná hodnota je poté brána jako schopnost zabíhavosti daného vosku. Forma pro zkoušku zabíhavosti lze vidět na obrázku 12. [22], [23]



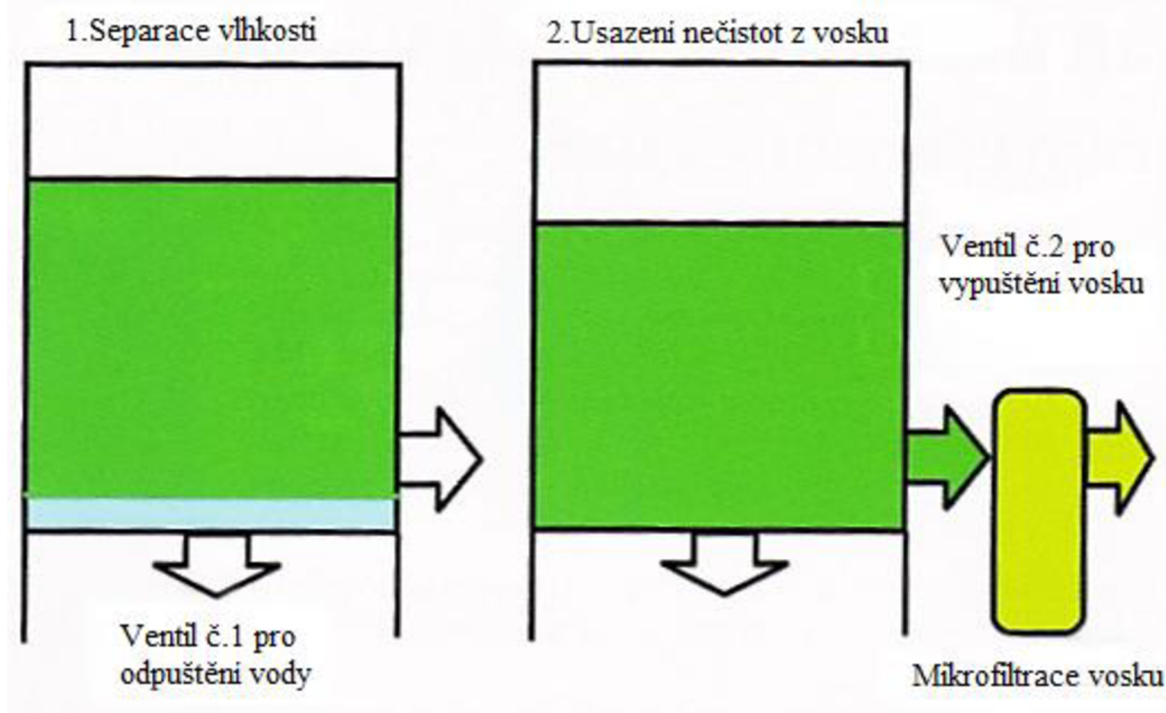
Obr. 12 Forma pro zkoušku zabíhavosti [23]

2.5 Regenerace a rekonstituce vosků

Regenerace vosků u technologie vytavitelného modelu je známa a praktikována již dlouho. Aktuální trend z hlediska finančního a životního prostředí je takový, že regenerace vosků je nedílnou součástí většiny dodavatelských firem. Dříve byl regenerovaný vosk ve slévárnách používán pouze jako levná varianta pro vtokové soustavy. Konkurence na trhu a také tlak ze strany sléváren donutil dodavatele vosků produkovat regenerované vosky za nižší ceny. Řešením bylo rozšířit škálu využití regenerovaného vosku a zefektivnit proces regenerace. Pokročilejší proces regenerace, který je nazýván rekonstituce, tak nyní umožňuje vyrábět rekonstituované vosky s vlastnostmi velmi podobným k panenským voskům.

Téměř všechny slévárny využívají k vytavení vosku ze skořepiny boilerkláv. Vytavený vosk je sveden do určité nádoby a zde je ponechán ztuhnout. Ztuhlý vosk je poté většinou přepravován ve velkých blocích k dodavateli, anebo je regenerace prováděna přímo ve slévárně. Tento vosk většinou obsahuje značné množství vody, plnivo (pokud je použito), keramické úlomky ze skořepinové formy a jiné nečistoty. Výše znečištění vosku je u každé slévárny jiná a záleží na mnoha faktorech. [17], [27]

Regenerace: vosk je umístěn do velké nádrže roztaven. Teplota musí být udržována na určitém stupni, aby došlo k usazení vody na dnu nádoby. Jakmile se voda usadí na dnu nádrže, je vypuštěna skrze ventil pryč. Vosk je přemístěn do jiné nádrže, kde je opět zahřát. Nyní je nutno udržovat vosk na přesné teplotě dané výrobcem, aby došlo k usazení veškerých nečistot. Tato fáze trvá zpravidla kolem 24 hodin, ale doba záleží především na obsahu popela ve vosku. Poté je vosk přefiltrován skrze mikrofiltrační systém a zkontrolován obsah popela. Schéma procesu je zobrazeno na obrázku 13. [27], [28]



Obr. 13 Schéma procesu regenerace vosku [28]

Rekonstituce: proces rekonstituce se skládá z těchto základních kroků:

1. Tavení

K roztavení vosku se používá zařízení, které se skládá z ocelové krabice, která je připevněna k velké nádrži. Nahoře v nádrži je umístěn systém potrubí, ve kterém proudí pára. Ve spodní části nádrže je umístěn sekundární systém parního potrubí. Bloky ztuhlého vosku se položí na vrchní systém potrubí a ztuhlý vosk se začne rychle tavit a prokapávat skrz vrchní potrubí do spodní části nádrže. Zde udržuje vosk v kapalně fázi sekundární systém potrubí. Jelikož teplota páry v potrubí se pohybuje okolo 140°C, vosk je v kontaktu s trubkou velmi krátký čas a odtavuje se po tenkých vrstvách. Tímto je zaručeno, že část vody, která je ve vosku obsažena, se přemění v páru. Odsavač umístěný ve vrchní stěně nádrže odsaje všechny výpary a páru a vypustí je zpět do atmosféry. [27]

2. Sušení

Všechn roztavený vosk je napumpován do sušících nádob. V tomto stádiu vosk stále obsahuje vodu, plnivo a jiné pevné látky. Systém parního potrubí umístěný v sušící nádobě ohřívá vosk na teplotu 100°C. Jakmile je dosaženo této teploty, voda obsažená ve vosku začne vařit a vypařovat se. Čas, za který se veškerá voda odpaří, se odvíjí od množství vody, chemického složení a celkového objemu vosku.

Následující krok se odvíjí od požadovaného typu vosku, který má být

rekonstitucí získán. Vysušený vosk může být přefiltrován k dosažení neplněného (přímého), rekonstituovaného vosku nebo může být odstředěn k dosažení plněného vosku. [17], [27]

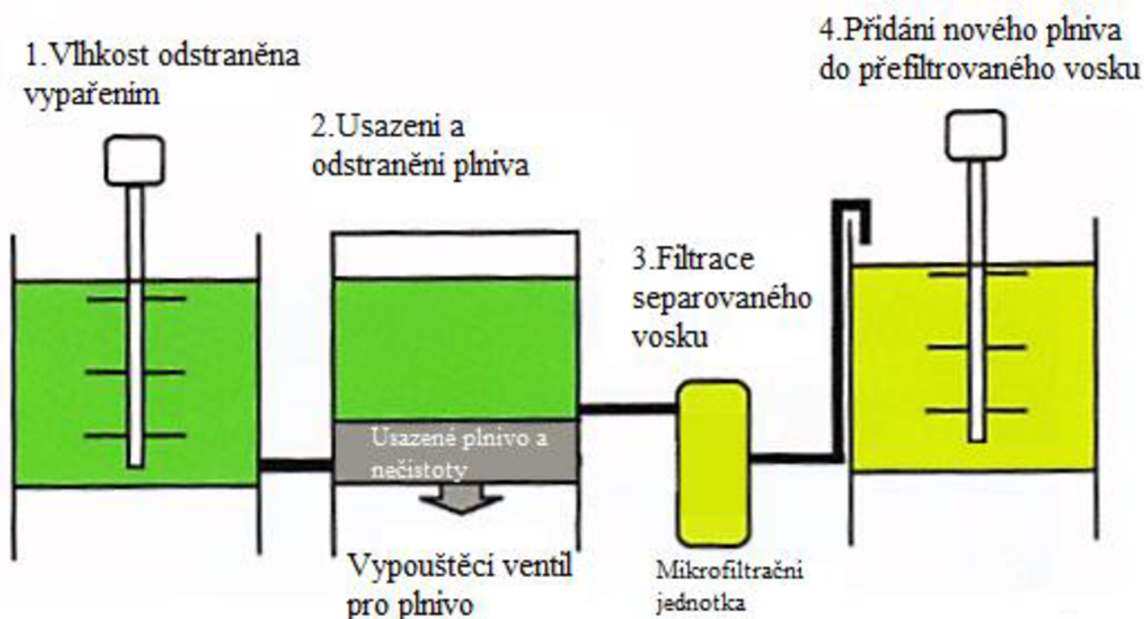
3. Filtrace

Vysušený vosk je čerpán do lisu skrze tkaninový filtr, na kterém se zachytí keramické úlomky, plnivo a jiné pevné nečistoty. Filtrování pokračuje do doby, než je lis zcela zaplněn. Po zaplnění lisu se proces zastaví, vosk se vytáhne a uloží do kontejneru, lis je vyčištěn a proces se opakuje. [27]

4. Odstředění

Vysušený vosk je čerpán skrze malou, vysokorychlostní odstředovačku, která odstraní z vosku materiály s vysokou hustotou, jako jsou keramické úlomky, ovšem materiály s hustotou podobnou vosku zůstanou přítomny. Dojde tak k odstranění anorganických nečistot, ale polymerické plnivo ve směsi zůstane. [27]

Schéma procesu rekonstituce je zobrazeno na obrázku 14.



Obr. 14 Schéma procesu rekonstituce vosku [28]

3 VOSKOVÉ MODELŮ

Kvalitní voskový model je jedním z nejdůležitějších faktorů u technologie vytavitelného modelu. Konečné rozměry modelu, jakost povrchu a veškeré nedokonalosti a vady na voskovém modelu se přenesou na konečný odlitek. Příprava výroby a samotná výroba voskového modelu proto musí být udělána co nejprecizněji, aby bylo v závěru dosaženo přesného odlitku. [29]

3.1 Zařízení k výrobě voskových modelů

K výrobě voskových modelů slouží formy a příslušné zařízení (vstřikolisy), kterými je vosk do formy dopraven. [21]

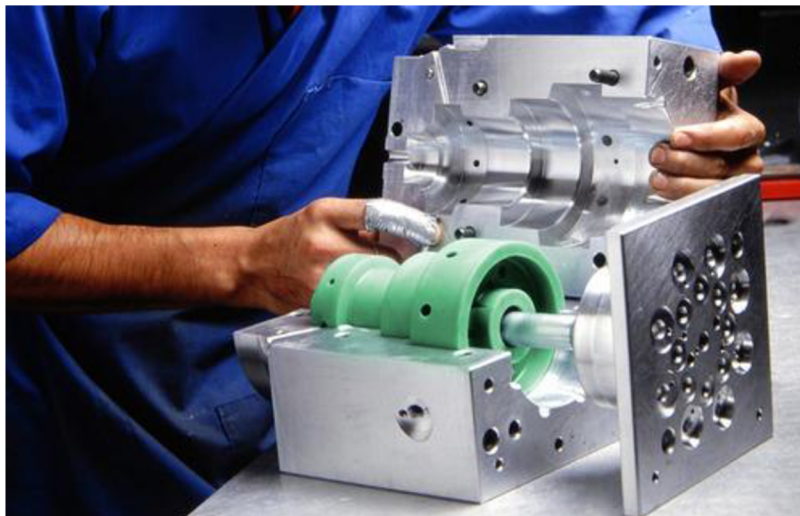
Formy

Jako první operace u technologie vytavitelného modelu je výroba matečné formy. Forma musí splňovat několik důležitých požadavků, jako například možnost výroby kvalitních voskových modelů s výbornou jakostí povrchu, s dodržením požadovaných rozměrů, bez staženin a dalších vad a dále také s co nejkratším setrváním odstříknutého modelu ve formě. Dále by se při výrobě mělo zohlednit hledisko, kolik kusů voskových modelů bude ve formě vyrobeno. [30], [31]

Formy lze rozdělit dle způsobu výroby (obrábění, odlévání, galvanoplastika, metalizace). Dle účelu a použití (k výrobě vtoků, nálitků, kolektorů apod. nebo k výrobě vlastních modelů). Dále dle konstrukce (pro jeden model, pro více modelů, ve formě výměnných vložek do upínacích stolic vstřikolisů). Dále lze formy rozdělit dle stupně mechanizace a dle materiálu formy. [30]

A. Výroba formy obráběním

Modely vyrobené v těchto formách jsou nejpřesnější. Používají se tam, kde je požadována velkosériová výroba a dlouhá životnost. Nevýhodou jsou ovšem vysoké náklady na výrobu, a pokud se v modelu vyskytnou dutiny, které jsou mimo dělicí rovinu, musí se použít výsuvné jádra. Umístění výsuvných jader je složité a pracné. Jako materiál na výrobu těchto forem se používá ocel a slitiny hliníku. [30], [31] Formu zhotovenou obráběním lze vidět na obrázku 15.



Obr. 15 Forma zhotovená obráběním [32]

B. Výroba formy podle matečného modelu

- Formy ze sádry

Matečný model je zalit sádrou a poté se nechá vše ztuhnout. Po vyjmutí matečného modelu ze sádry je forma připravena k použití. Životnost těchto forem je velmi malá. Využívají se především tam, kde je potřeba ověřit navrhovanou technologii výroby a také při výrobě jednotlivých modelů bez velkých nároků na přesnost. [30], [31]

- Formy z nízkotavitelných slitin

Jejich výroba je poměrně jednoduchá a vyrobené modely mají kvalitní povrch. Kovový matečný model je z jedné poloviny zalit nízkotavitelnou slitinou. Z druhé strany je usazen do ocelového pláště. Nevýhodou je jejich nízká životnost. [30], [31]

- Formy ze zinkových slitin

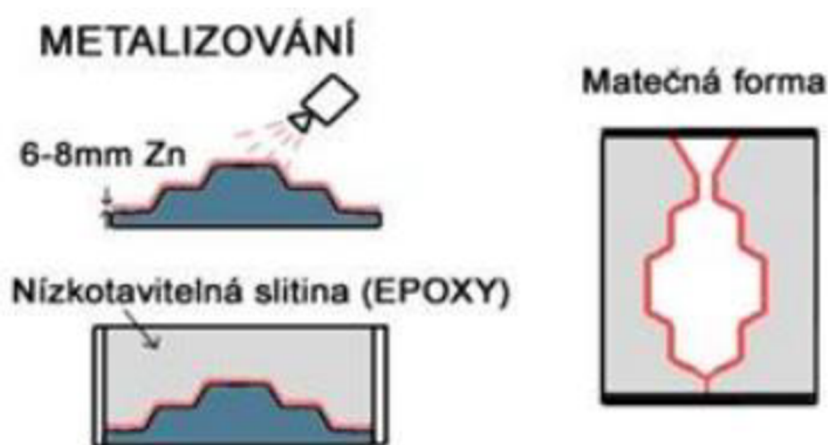
Princip výroby je stejný jako u forem z nízkotavitelných slitin s rozdílem, že je matečný model zalit zinkovou slitinou. Tyto formy jsou tvrdší a odolnější proti opotřebení. Lze je proto používat pro větší série. Nejsou ovšem vhodné pro výrobu modelů s velkými dutinami. [30]

- Formy ze silikonového kaučuku

Matečný model je zalit silikonovým kaučukem. Výhodou těchto forem je snadné odlévání tvarově složitých modelů (tenkostěnné modely, modely s negativními úkosy) a také jejich nízká cena. Nevýhodou je jejich životnost, proto jsou použitelné pouze pro malé série. [31]

- Formy vyrobené metalizováním

Princip této metody (lze vidět na obrázku 16) spočívá v nanášení roztavených částic kovu na mateční model metalizační pistolí. Rozprášené částice se na povrchu matečného modelu deformují, spojují a vytváří souvislou vrstvu. Výsledná vrstva má tloušťku okolo 3 mm a přesně kopíruje tvar, na který je kov nanášen. Vzniklá kovová skořepina se poté zalije epoxidovou pryskyřicí a forma je připravena k použití. Výhodou je vysoká životnost formy a její rychlá, levná výroba. Nevýhodou je její komplikovaná úprava a modely vyžadují obvykle ořezávání. [30], [31]

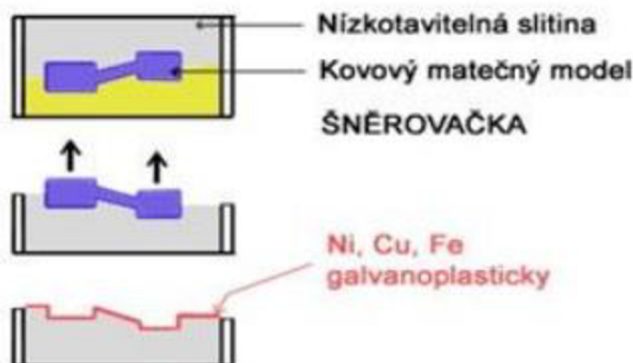


Obr. 16 Výroba formy metalizováním [31]

- Formy vyrobené galvanoplasticky

Funguje na principu elektrolýzy. Matečný model je ponořen do galvanické lázně, kde se na něj nabalí malá vrstva kovu. Takto vzniklá skořepina se poté zalije epoxidovou pryskyřicí jako u metody metalizování, anebo slitinou hliníku. Tyto formy lze použít pro složité a komplikované modely. Nehodí se na výrobu modelů se zářezy, otvory a hlubokými drážkami. Princip je patrný na obrázku 17. [30], [31]

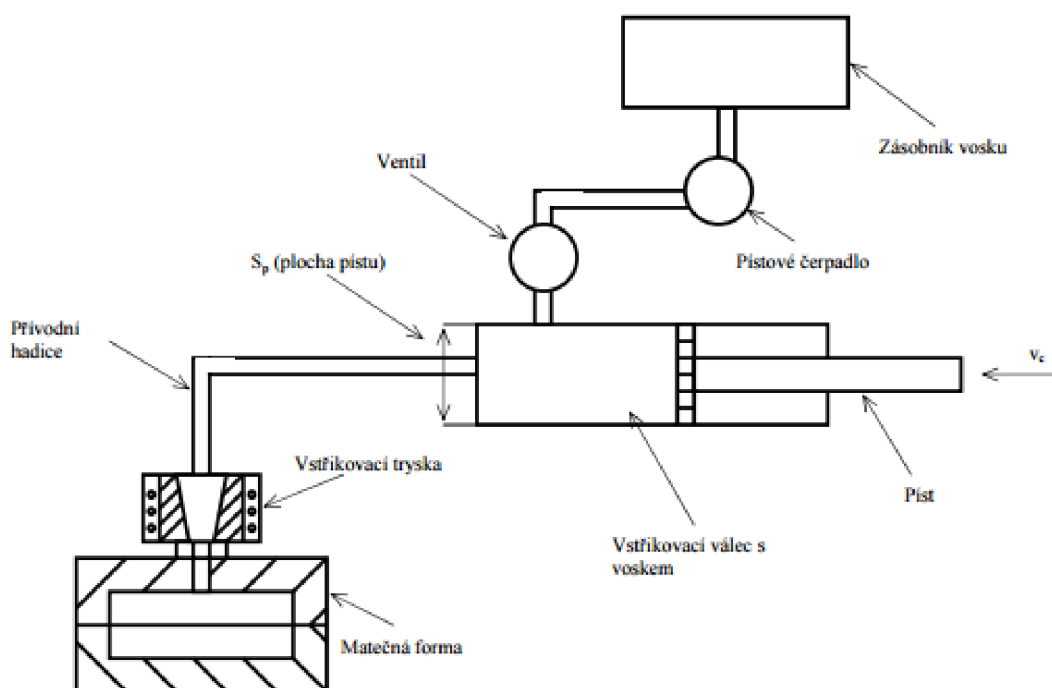
GALVANOPLASTIKA



Obr. 17 Výroba formy pomocí galvanoplastiky [31]

Vstříkolisy

Gravitační lití vosku do forem se dnes využívá už jen velice zřídka a to většinou pouze pro výrobu vtokových kanálů. Hlavním způsobem výroby modelů je vstříknutí vosku do matečné formy pomocí zařízení, které se nazývají vstříkolisy. Do formy je pod tlakem vstříknut vosk, který má teplotu 55-90 °C. Princip je patrný z obrázku 18. Vosk se poté nechá ve formě ztuhnout na manipulační pevnost a poté se vyjme. Následuje očištění od případných otřepů nebo nedokonalostí vzniklých ve formě a musí se nechat před sestavením do stromečku „vyzrát“. Tento proces trvá minimálně 24 hodin. [21], [30], [31]



Obr. 18 Základní princip vstříkolisu [21]

Vstříkolisy se rozdělují dle stavu vosku, který jsou schopny vstříkovat [30]:

- tekutý vosk
- kašovitý vosk
- pevný vosk

3.2 Rapid prototyping

Rapid prototyping (RP) neboli rychlá výroba prototypu, umožňuje vyrábět modely v relativně krátkém čase (hodiny, dny). Použitím této technologie dochází také k úspoře výrobních nákladů, jelikož lze model vytvořit přímo z 3D dat vytvořených CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing). Jedná se většinou o aditivní technologie, kde je principem postupné přidávání materiálu namísto jeho klasického odebrání u obrábění. Většina metod používaných v průmyslu pracuje v jednotlivých vrstvách, které jsou na sebe postupně nanášeny. [33]

V dnešní době existuje mnoho metod RP, které se liší hlavně fyzikálním principem výroby modelu. Většina technologií se dá rozdělit do tří základních skupin [33]:

- Metody RP založené na tekutém základě
- Metody RP založené na pevném základě
- Metody RP založené na práškovém základě

Metody, které používají k výrobě modelů vosk, spadají do kategorie metod založených na pevném základě. Jsou to metody Multi-Jet Modeling (MJM) a Smooth Curvature Printing (SCP[®]).

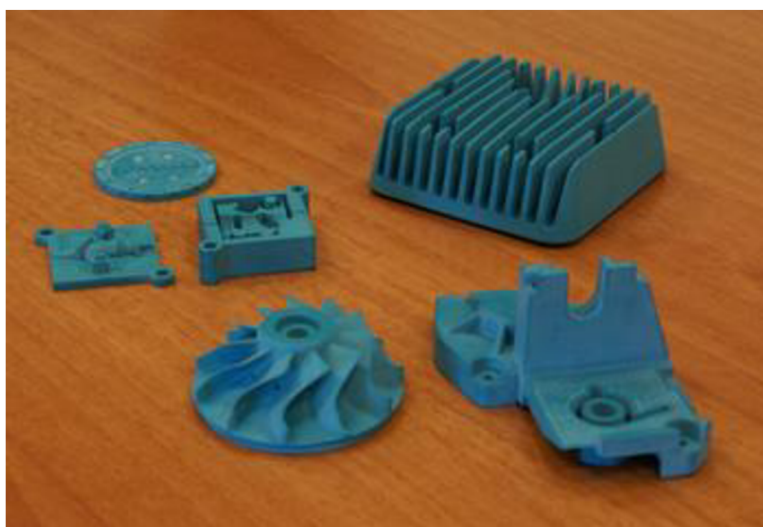
A. Multi-Jet Modeling (MJM)

MJM je metoda vyvinutá společností 3D Systems, Inc. roku 1996. Používá se na tzv. ThermoJet[®] nebo modernějších ProJet[®] 3D tiskárnách. Je využívána pro výrobu ukázkových modelů a k výrobě voskových modelů pro technologii vytavitelného modelu. Tato technologie využívá piezoelektrické tiskové hlavy, které vypouští na pracovní pole vrstvy fotopolymeru nebo slévárenského vosku. Jakmile se dokončí jedna vrstva modelu, pracovní pole se od tiskárny oddálí o určitou vzdálenost a vytváří se další vrstvy až po konečný tvar součástí. V tiskárně je také umístěna UV lampa, která se v určitých intervalech spíná a vytvrzuje tak součást. [33], [34]

B. Smooth Curvature Printing (SCP[®])

SCP[®] je nová metoda vyvinutá americkou firmou Solidscape Inc. se sídlem v New Hampshire. Využívá Solidscape T76 Benchtop 3D tiskárnu. Tato technologie zaručuje nejvyšší možnou přesnost při výrobě voskových modelů a také vynikající jakost

povrchu. Tisknou se výhradně voskové modely určené pro metodu vytavitelného modelu. Základním principem výroby voskového modelu je použití dvou typů vosků (stavební a podpůrný), které mají rozdílné vlastnosti. Tiskárna využívá dvě piezoelektrické trysky. Jedna na stavební a druhá na podpůrný vosk. Jednotlivé vosky jsou postupně vrstveny na stavební podložku. Jakmile je voskový model hotový, následuje vyprání v čisticí lázni s teplotou 50 °C (při této teplotě dojde beze zbytku k rozpuštění podpůrného vosku). Takto získaný model (obrázek 19) lze poté bez dalších úprav rovnou připojit ke vtokové soustavě a obalit v keramické břecce. [35], [36]

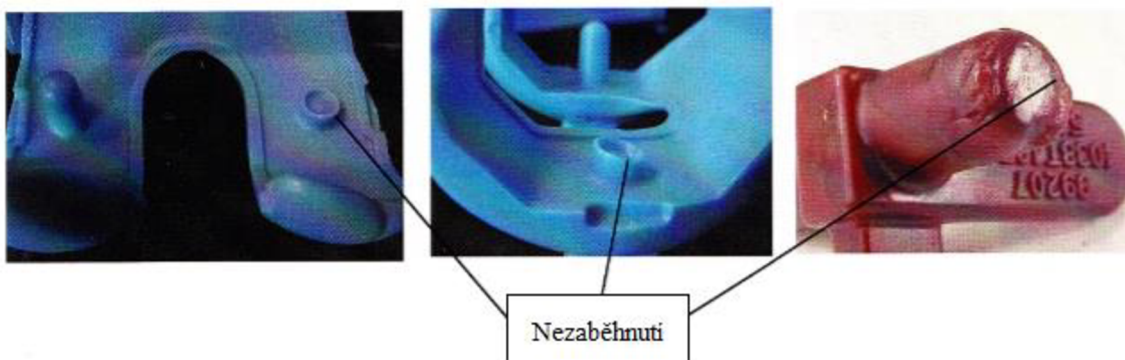


Obr. 19 Ukázky voskových modelů vytvořených technologií SCP® [35]

3.3 Vady voskových modelů

Vady voskových modelů mohou vznikat a také vznikají, především kvůli technologickým chybám v procesu výroby. Tyto chyby lze omezit správným plánováním výroby a průběžnými kontrolami. Mezi nejčastější vady voskových modelů patří [37]:

A. Nezaběhnutí [37], [38]

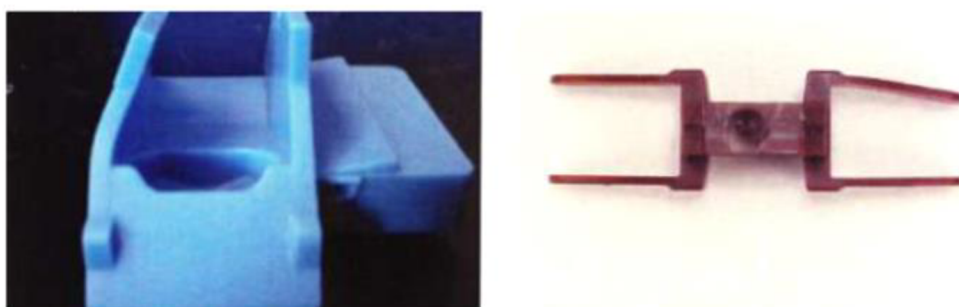


Obr. 20 Nezaběhnutí vosku do matečné formy [37]

Příčiny defektu: nedostatečný tlak při vstřikování, nedostatečný tok vosku, příliš vysoká rychlost toku vosku způsobující zachycení vzduchu v matečné formě, malá dávka voskové směsi, špatná konstrukce formy (vtokový kanál, odvzdušnění, víření), studená forma, studená vosková směs, nadměrná separace.

Opatření proti defektu: zvýšení vstřikovacího tlaku, zvýšení teploty formy a voskové směsi, upravit rychlost průchodu směsi formou.

B. Zkroucení [37], [38]

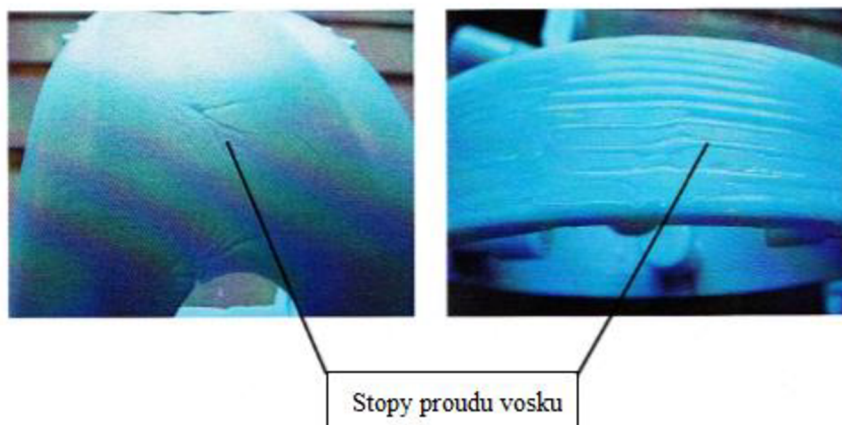


Obr. 21 Zkroucení voskového modelu [37]

Příčiny defektu: krátký průběh cyklu (vyjmutí modelu z formy příliš brzy), příliš horký vosk nebo forma, vytvoření podtlaku pod výsuvnými jádry, umístění vyhazovacích kolíků, skladování (teplota, rovná podložka).

Opatření proti defektu: prodloužení vstřikovacího cyklu (model musí být dostatečně chlazen), snížení teploty formy a vosku.

C. Stopy po proudu vosku [37], [38]

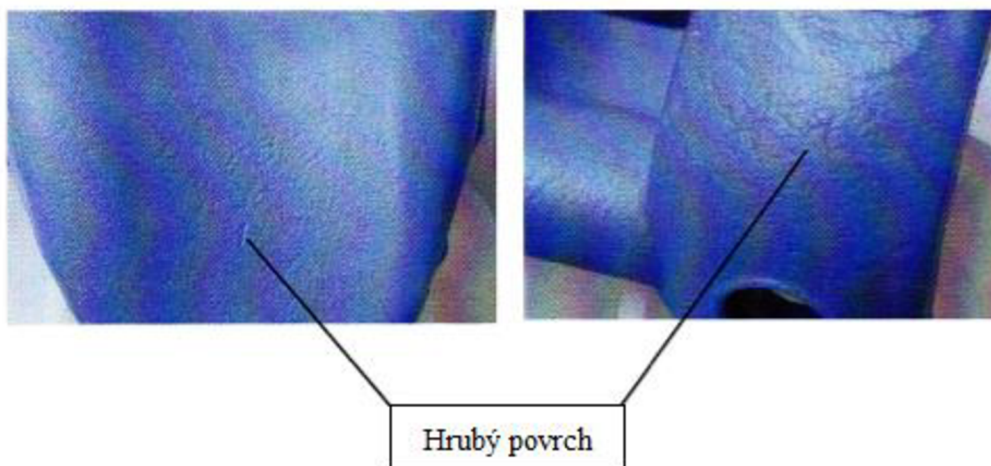


Obr. 22 Stopy po proudění voskové směsi v matečné formě [37]

Příčiny defektu: nízká teplota formy a vosku, špatný tok vosku ve formě (příliš rychlý nebo pomalý), slabé odvzdušnění formy, nízký vstřikovací tlak, nevhodná konstrukce vtokového kanálku.

Opatření proti defektu: zvýšení teploty vosku a formy, upravit tok vosku ve formě, zvýšení vstřikovacího tlaku, přidání nebo vyčištění odvzdušnění.

D. Hrubý povrch (pomerančová kůra) [37], [38]

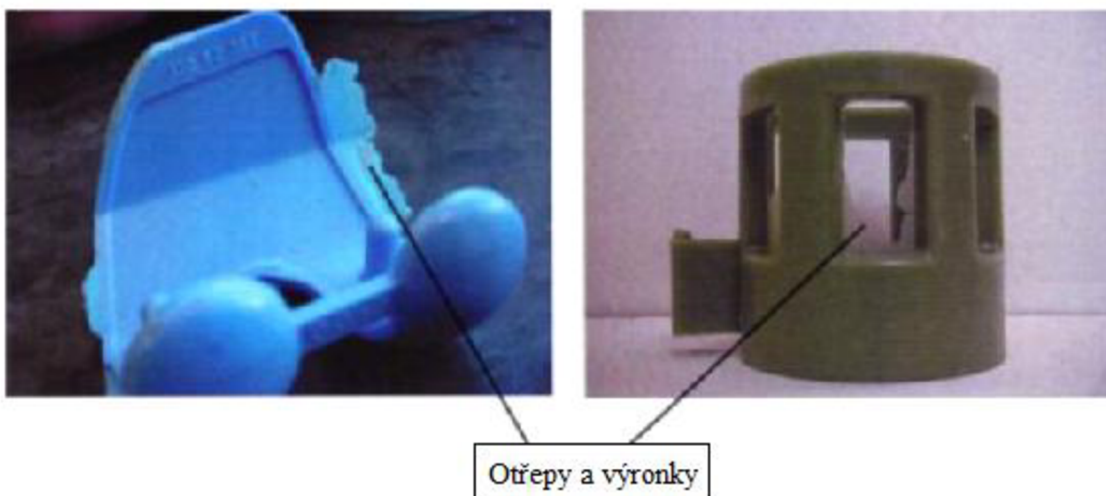


Obr. 23 Hrubý povrch na modelu připomínající pomerančovou kůru [37]

Příčiny defektu: nízká teplota vosku a formy, nízký vstřikovací tlak, nedostatečný tok vosku ve formě, separace plniva, hrubý povrch matečné formy.

Opatření proti defektu: zvýšení teploty vosku, zvýšení vstřikovacího tlaku, upravení toku vosku ve formě, použití správného plniva nebo upravení parametrů stávajícího plniva, omezení chlazení formy, vyčištění povrchu matečné formy.

E. Otřepy a výronky [37], [38]

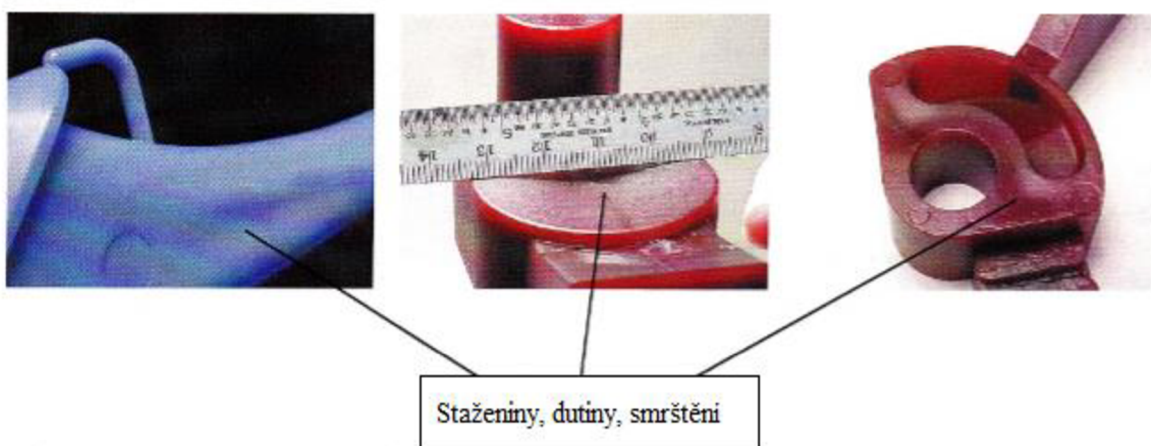


Obr. 24 Otřepy a výronky na voskovém modelu [37]

Příčiny defektu: vysoký vstřikovací tlak, nízký tlak sevření formy, vysoká teplota vosku, nedoléhající stěny formy, příliš vysoký vstřikovací tok vosku, opotřebená nebo poškozená forma.

Opatření proti defektu: snížení vstřikovacího tlaku (příliš vysoký tlak může způsobit otevření formy), zvýšení tlaku sevření formy, snížení teploty vosku, snížení vstřikovacího toku vosku, kontrola formy a případná oprava.

F. Staženiny, dutiny a smrštění [37], [38]

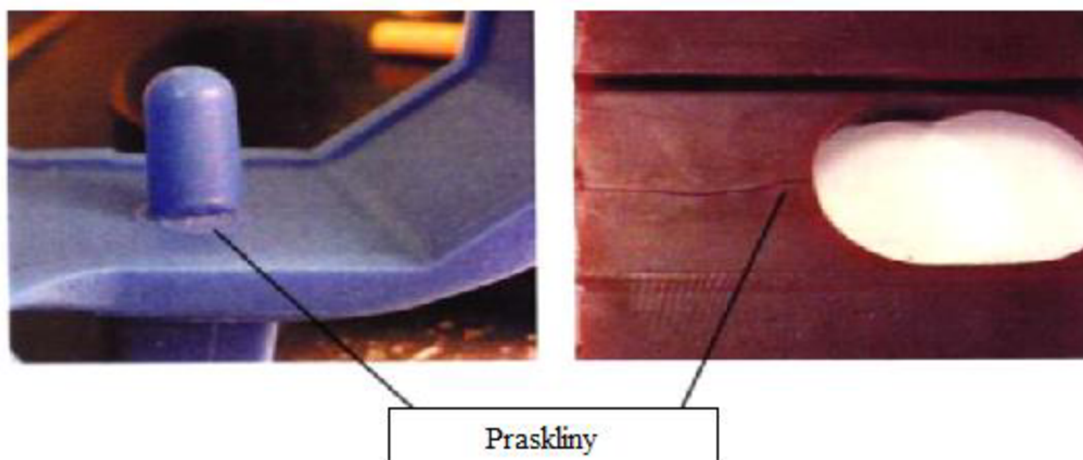


Obr. 25 Případy objemových vad na modelech [37]

Příčiny defektu: vysoká teplota vosku, nízký vstříkovací tlak, krátká vstříkovací doba, nesprávná teplota formy, špatný tok vosku, příliš malý a dlouhý vtokový kanálek a jeho špatné umístění, nevhodný výběr vosku pro danou aplikaci.

Opatření proti defektu: snížení teploty vosku a úprava teploty formy, zvýšení vstříkovacího tlaku a doby, změna konstrukce vtokového kanálku, změna voskové směsi.

G. Praskliny [37], [38]

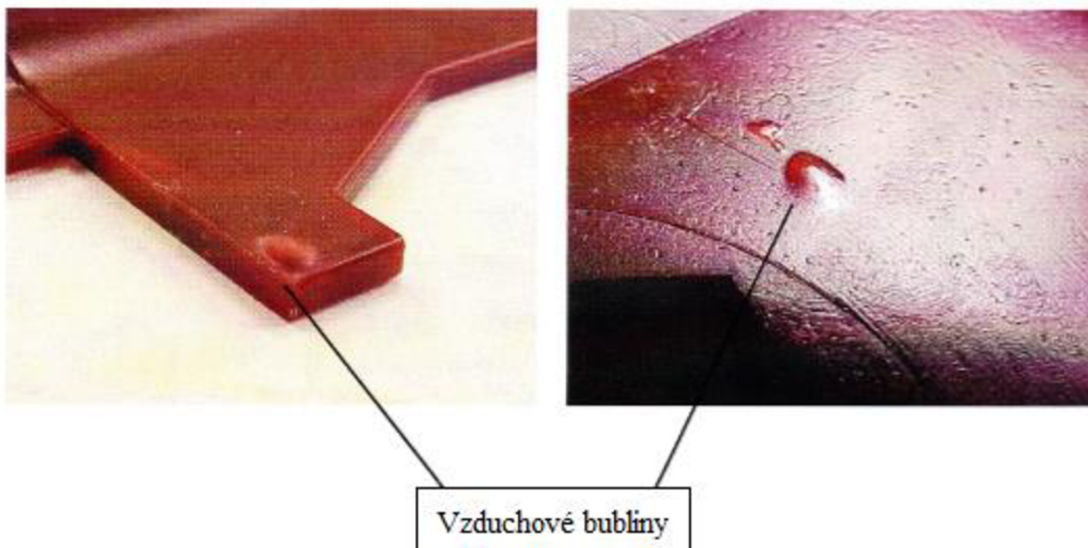


Obr. 26 Praskliny na voskovém modelu [37]

Příčiny defektu: příliš dlouhý čas vstříkování, studená forma, vysoký vstříkovací tlak (model se poté těžce vytahuje z formy), špatné otevírání formy a odebírání modelu z formy, ostré rohy formy (koncentrátor napětí), nevhodné umístění vyhazovacích kolíků, hrubý povrch formy, špatná vosková směs.

Opatření proti defektu: snížení vstříkovacího tlaku a doby vstříkování, zvýšení teploty formy, opatrné otevírání formy bez poškození modelu, vyčištění formy.

H. Vzduchové bubliny [37], [38]



Obr. 27 Vzniklé bubliny na stěně voskového modelu [37]

Příčiny defektu: nadměrná rychlost průtoku vosku do formy, nesprávná teplota vstříkovací trysky, špatné vstupní suroviny, vysoká teplota vosku, vzduchové bubliny uzavřené ve voskové směsi, špatná velikost a pozice vtokového kanálku, nesprávná teplota formy, špatné odvětrání formy.

Opatření proti defektu: snížit rychlost průtoku vosku do formy, upravit teplotu vstříkovací trysky, vosku nebo formy, upravit polohu ventilů ve formě, kontrola čistoty ventilů, upravit pozici a velikost vtokového kanálku (zamezení víření vosku ve formě).

I. Rozměrová přesnost [37], [38]



Obr. 28 Nedodržení požadovaných rozměrů [39]

Příčiny defektu: rozdílný vstřikovací tlak, různá doba cyklu vstřikování, teplota vosku a formy, vysoká teplota vstřikovací trysky, nevhodná konstrukce vtokového kanálku nebo formy, špinavá forma, separace plniva, znečištěný vosk.

Opatření proti defektu: správné nastavení vstřikovacího tlaku a ten udržovat po celou dobu vstřikování daného modelu, cyklus vstřikování udržovat v krátkém rozmezí, správná teplota vosku, chlazení formy, upravit konstrukci vtokového kanálku nebo celé formy, čistá forma, kontrola vlastností vosku a případně nahradit za jiný.

3.4 Ukázky voskových modelů a konečných odlitků

Na obrázku 29 je vyfocený voskový model prstenu, zhotovený pomocí technologie Rapid Prototyping. Lze vidět, jakých detailů je možné dosáhnout pomocí této technologie.



Obr. 29 Voskový model prstenu [40]

Na obrázku 30 jsou vyfocené voskové modely opět zhotovené technologií Rapid Prototyping a rovněž výsledné odlitky z těchto modelů.



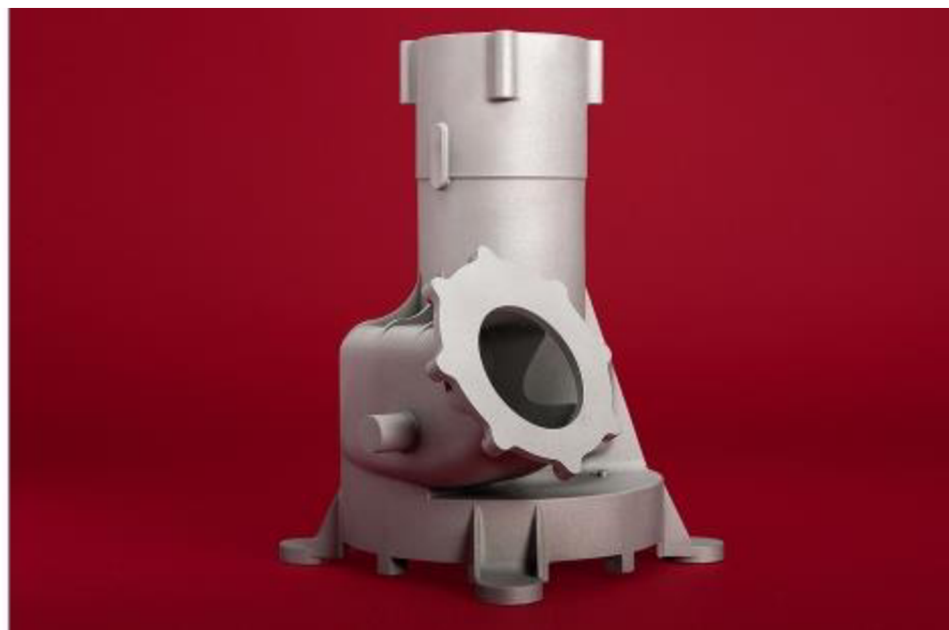
Obr. 30 Voskové modely a výsledné odlitky [41]

Obrázek 31 představuje keramické jádro, voskový model s keramickým jádrem a výsledný odlitek.



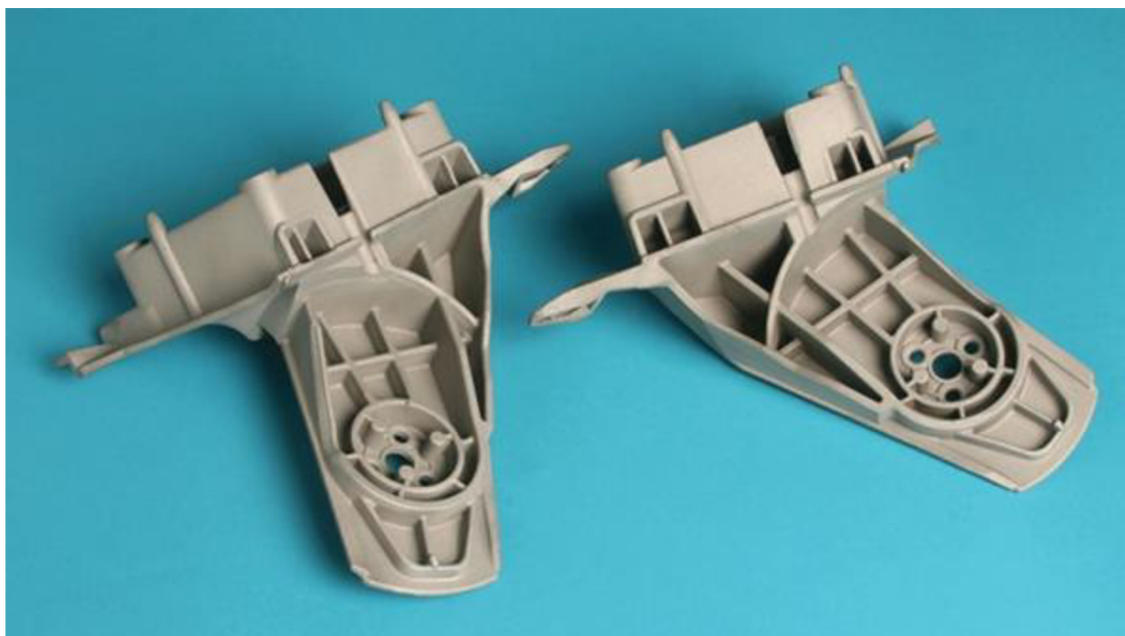
Obr. 31 Keramické jádro, voskový model s keramickým jádrem a hotový odlitek [42]

Na obrázku 32 je hliníkový odlitek krytu čerpadla, který bude používán v leteckém průmyslu a bude vystaven vysokým tlakům kapaliny. Rozměry odlitku jsou 305x203x203 mm a hmotnost je 1729 gramů. Stěna krytu je 19 milimetrů tlustá. [43]



Obr. 32 Hliníkový odlitek krytu čerpadla [43]

Na obrázku 33 je hliníkový odlitek pravého a levého držáku zrcátka na automobil. Rozměry odlitku jsou 190,5x190,5x117 milimetrů. Tento odlitek vyhrál v kategorii Automobilový odlitek v soutěži ICI Design Contest v roce 2014. [44]



Obr. 33 Pravý a levý držák zrcátka na automobil [44]

Na obrázku 34 je odlitek z nerezové oceli pláště turba. Rozměry odlitku jsou 254x305x203 milimetrů. Odlitek byl dříve odléván do písku, ovšem ke snížení hmotnosti, tloušťky stěny, jakosti povrchu a lepšímu proudění vzduchu v odlitku, byla zvolena technologie vytavitelného modelu. [45]



Obr. 34 Odlitek pláště turba [45]

ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo vypracovat literární rešerši na téma trendy ve výrobě voskových modelů u technologie vytavitelného modelu. Práce obsahuje obecný popis technologie vytavitelného modelu, dále je rozdělena na dvě hlavní kapitoly a to jsou voskové směsi a voskové modely. V kapitole voskové směsi jsou rozebrány typy voskových směsí, základní složky voskových směsí, regenerace a rekonstituce a dále jejich vlastnosti a zkoušení. V kapitole voskové modely jsou popsány zařízení k výrobě voskových modelů, vady, které mohou vznikat při výrobě a také výsledné odlitky, které lze touto technologií vyrobit. Důraz je kladen především na nejmodernější zařízení a suroviny používané u této technologie se zaměřením na výrobu voskového modelu.

Technologie vytavitelného modelu je v dnešní době jedna z nejprogresivnějších technologií ve slévárství. Lze vyrábět velice přesné odlitky s vynikající jakostí povrchu, u kterých již není potřeba jiného dalšího opracování. Odlitky je možné vyrábět z široké škály slitin a uplatňují se především v průmyslu leteckém, automobilovém, energetickém a také ve zdravotnictví.

Aby bylo možné pokračovat v trendu, kterým se tato technologie vyvíjí, je potřeba neustále provádět výzkum a vývoj nových věcí a zdokonalovat věci stávající. V případě ekonomického a ekologického hlediska v dnešní době hraje velkou roli regenerace a rekonstituce vosků. Tento proces nabízí již téměř všechny dodavatelské firmy a také se ho snaží zavádět přímo samotné slévárny. K zefektivnění výroby a docílení opakovatelnosti se v dnešní době zavádí do výroby roboti a automatizované linky, což umožňuje také celkovou kontrolu výroby. Jelikož je v dnešní době kladen důraz na rychlost a přesnost, bývá ve slévárnách k výrobě prototypů zaváděna technologie Rapid Prototyping. Tato technologie umožní vytvořit velice přesný a detailní voskový model během několika hodin, popřípadě dnů. Celkový čas pro výrobu odlitku je poté pouze několik dnů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] The history of investment casting. *Metrocast Italiana* [online]. b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.metrocast.it/inglese/history.html>
- [2] Home. *Shellcast foundries* [online]. 2012 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.shellcast.com/index.html>
- [3] BEELEY, Peter a Robert SMART. *Investment Casting*. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 09-017-1666-9.
- [4] HORÁČEK, Milan. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2001, (10). ISSN 0037-6825.
- [5] DAL-AIR INVESTMENT CASTINGS, INC. History. DAL-AIR INVESTMENT CASTINGS, INC. *Dalaircasting: History* [online]. 2008 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.dalaircasting.com/investment-castings/history/>
- [6] ŠMÍD, Dušan. *Optimalizace technologie vybraných náročných odlitků ze slitin Al*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [7] NOWAK. Process. NOWAK. *Nowak: Process* [online]. 2015 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.nowak.fr/english/cadreprocessflash.htm>
- [8] WILLIAMS, R. Update on Investment Casting Wax. In: *Investmentcastingwax: Technical lectures* [online]. 1991 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl10.pdf>
- [9] BROWN, Robert a Joe STANCO. Wax Characterisation. In: *Remet: Technical papers* [online]. 2002 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.remet.com/technical-papers/>
- [10] WILLIAMS, R.B. Waxes for investment casting - a view from England. In: *Investmentcastingwax: Technical Lectures* [online]. Chicago, 1987 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl1.pdf>
- [11] HIRST, Richard. Understanding investment casting wax. In: *Investmentcastingwax: Technical lectures* [online]. b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl9.pdf>
- [12] ANIBARRO, Marcelo. Water soluble cores for investment casting. In: *Remet: Technical papers* [online]. 2007 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.remet.com/technical-papers/>
- [13] Product Information - Water Soluble Wax. In: *Blayson technical advice* [online]. 2013 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.blayson.com/downloads/technical-advice>
- [14] Categories of investment Casting Wax. *Investmentcastingwax: Categories* [online]. b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/categories.php>
- [15] Blayson Wax Products. *Blayson: Products* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.blayson.com/blayson-products/wax>
- [16] What is Recycled Wax. In: *Blayson: Blayson Technical advice* [online]. b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.blayson.com/downloads/technical-advice>

- [17] Cost Reduction Through Wax Reclamation. In: *Investmentcastingwax: Technical lectures* [online]. 2009 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl17.pdf>
- [18] The Basics of Investment Casting Wax. In: *Investmentcastingwax: Technical lectures* [online]. b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl8.pdf>
- [19] BOND, David a Koji NISHIKAWA. Investment Casting Wax Technology. In: *Investmentcastingwax: Technical lectures* [online]. b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>
- [20] BOND, David. Developments of Stable Filled Wax. In: *Investmentcastingwax: Technical lectures* [online]. Tokyo, 2009 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl18.pdf>
- [21] 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>
- [22] HANCOCK, Phil, Dave BOND a Matthew WILLIAMS. Inovative Test Methods for Wax. In: *Investmentcastingwax: Technical lectures* [online]. Schaumburg, 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl27.pdf>
- [23] Wax Testing. In: *Investmentcastingwax: Technical lectures* [online]. 2011 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl21.pdf>
- [24] KOBĚRSKÝ, František. *Optimalizace výroby voskových modelů - voskové směsi a jejich zkoušení*. Brno, 2010. Bakalářská práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [25] 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.
- [26] FIELDER, Harvey. Mechanical Properties of Pattern Waxes. In: *Remet: Technical papers* [online]. Crayford, Kent, 2001 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.remet.com/technical-papers/>
- [27] FIELDER, Harvey. The Reclamation of Investment Casting Waxes. In: *Technical papers* [online]. Monte Carlo, 2001 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.remet.com/wp-content/uploads/downloads/2013/06/Technical-Paper-47-The-Reclamation-of-Investment-Casting-Waxes.pdf>
- [28] ZADE, Rajesh. Recycling of Pattern Waxes. *Incast*. 2016, (3), 26-27.
- [29] KOSOUR, Vojtěch, Milan HORÁČEK a Jiří HORENSKÝ. Kvalitní voskový model - základní předpoklad kvalitního odlitku zhotoveného metodou vytavitelného modelu. *Slévárnství: Časopis pro slévárenský průmysl*. 2012, (9-10), 329-331.
- [30] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/419638-Ing-ales-herman-ph-d.html>
- [31] SOUKUPOVÁ, Lucie. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno, 2011. Bakalářská práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [32] Investment Casting Wax. *Westechwax: Casting Waxes* [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/investment-casting-wax>

- [33] VAŠEK, Vojtěch. *Možnosti uplatnění moderních metod při výrobě prototypových odlitků*. Brno, 2015. Bakalářská práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [34] Learning Center. *3dsystems* [online]. 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/resources/learning-center>
- [35] BUK, Václav a Karel HEINIGE. Solidscape T76 Benchtop - 3D tiskárna pro puntičkáře. In: *Cad: Hardware* [online]. b.r. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/hardware/78-hardware/1532-solidscape-t76-benchtop-3d-tiskarna-pro-puntickare.html>
- [36] T76 PLUS. *Solid-scape: 3D printers* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.solid-scape.com/products/3d-printers/t76plus/>
- [37] STRATTON, R. a Howard MONKS INVESTMENT CASTING INSTITUTE. *Atlas of Wax Pattern Defects. 2.* b.r..
- [38] JAKUB, Šmatelka. *Technologie lití na vytavitelný model - přehled vad*. Brno, 2012. Bakalářská práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Vít Mikulka.
- [39] Pattern Wax. *Westechwax: Casting Waxes* [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.westechwax.com/pattern-wax/>
- [40] How Wax Pattern 3D Printing Is Revolutionizing the Jewelry Industry. *3dprintingcolor* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.3dprintingcolor.com/wax-pattern-3d-printing/>
- [41] 3D Wax Growing Services. *3dprintingcolor* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.3dprintingcolor.com/3d-wax-growing/>
- [42] All About Tooling, Patterns and Cores. *Niagarainvestmentcastings: Design and Engineering* [online]. 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://niagarainvestmentcastings.com/design-and-engineering/all-about-tooling-patterns-and-cores/>
- [43] Design Rules for Success in High-Value Markets. *Foundrymag: Molds/cores* [online]. 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://foundrymag.com/ICI-Design-Rules#slide-1-field_images-21331
- [44] Creativity, Complexity on Display in ICI Design Contest. *Foundrymag: Molds/cores* [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://foundrymag.com/moldscores/creativity-complexity-display-ici-design-contest#slide-2-field_images-17381
- [45] Creativity, Complexity on Display in ICI Design Contest. *Foundrymag: Molds/cores* [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://foundrymag.com/moldscores/creativity-complexity-display-ici-design-contest#slide-7-field_images-17381

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Odlitek z doby př. n. l. (vlevo) [1] a současnosti (vpravo) [2]
- Obr. 2 Historický odlitek z mědi cca 2000 let před naším letopočtem [5]
- Obr. 3 Princip technologie vytavitelného modelu [7]
- Obr. 4 Princip zjišťování bodu tuhnutí [24]
- Obr. 5 Princip měření bodu skápnutí [24]
- Obr. 6 Penetrometr [23]
- Obr. 7 Schéma měření viskozity vosku [23]
- Obr. 8 Schéma reometru s kontrolovaným smykovým napětím [25]
- Obr. 9 Forma na zkušební tyčinky [25]
- Obr. 10 Schéma komory diferenčního skenovacího kalorimetru [25]
- Obr. 11 Schéma zařízení na měření objemové roztažnosti vosku [25]
- Obr. 12 Forma pro zkoušku zabíhavosti [23]
- Obr. 13 Schéma procesu regenerace vosku [28]
- Obr. 14 Schéma procesu rekonstituce vosku [28]
- Obr. 15 Forma zhotovená obráběním [32]
- Obr. 16 Výroba formy metalizováním [31]
- Obr. 17 Výroba formy pomocí galvanoplastiky [31]
- Obr. 18 Základní princip vstříkolisu [21]
- Obr. 19 Ukázky voskových modelů vytvořených technologií SCP® [35]
- Obr. 20 Nezaběhnutí vosku do matečné formy [37]
- Obr. 21 Zkroucení voskového modelu [37]
- Obr. 22 Stopy po proudění voskové směsi v matečné formě [37]
- Obr. 23 Hrubý povrch na modelu připomínající pomerančovou kůru [37]
- Obr. 24 Otrěpy a výronky na voskovém modelu [37]
- Obr. 25 Případy objemových vad na modelech [37]
- Obr. 26 Praskliny na voskovém modelu [37]
- Obr. 27 Vzniklé bubliny na stěně voskového modelu [37]
- Obr. 28 Nedodržení požadovaných rozměrů [39]
- Obr. 29 Voskový model prstenu [40]
- Obr. 30 Voskové modely a výsledné odlitky [41]
- Obr. 31 Keramické jádro, voskový model s keramickým jádrem a hotový odlitek [42]
- Obr. 32 Hliníkový odlitek krytu čerpadla [43]

Obr. 33 Pravý a levý držák zrcátka na automobil [44]

Obr. 34 Odlitek pláště turba [45]

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Vliv plniv na roztažnost voskových směsí [21]

Graf 2 Změna tvrdosti voskové směsi v závislosti na teplotě [21]

