VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE VÝROBY VOSKOVÝCH MODELŮ - VOSKOVÉ SMĚSI A JEJICH ZKOUŠENÍ

OPTIMATION OF WAX PATTERN MANUFACTURE - WAX MIXTURES AND ITS TESTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE FRANTIŠEK KOBĚRSKÝ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): František Koběrský

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

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

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Optimalizace výroby voskových modelů - voskové směsi a jejich zkoušení

v anglickém jazyce:

Optimation of wax pattern manufacture - wax mixtures and its testing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Základním předpokladem výroby kvalitního odlitku metodou vytavitelného modelu je zhotovení kvalitního voskového modelu (rozměry, povrch atd.). To především znamená výběr vhodné voskové směsi s ohledem na tvar, složitost a velikost budoucí součásti. Velmi významné je také dosažení stabilních vlastností vosků (tvrdost, rychlost tuhnutí, teplota tavení, obsah popelovin atd.) a s tím souvisejících metod zkoušení vosků.

Cíle bakalářské práce:

Optimalizace technologie voskových modelů dle konkrétních podmínek slévárny, tj. především výběr vhodných vosků a jejich požadovaných parametrů a metod zkoušení.

Seznam odborné literatury:

1. BEELEY, PR. and SMART, RF. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
2. DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., aj. Výroba přesných odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
3. CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.
4. OTI, JA. The Science, Mechanics and Construction of Investment Casting Tooling without Rework. In Proceedings of the 50th ICI Conference. Chicago, 2002, p. 85-96.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se v první části zabývá obecným popisem a rozdělením vosků a voskových směsí pro přesné lití metodou vytavitelného modelu. Druhá část se věnuje popisem různých mechanických a fyzikálních vlastností vosků a jejich zkoušení.

Klíčová slova:

vosky, zkoušení vosků, přesné lití, vytavitelný model, fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with a general description and distribution of waxes and wax mixtures for investment casting in the first part. The second part is devoted to descriptions of various mechanical and physical properties of waxes and their testing.

Keywords:

waxes, wax testing, near-net-shape, investment casting, lost wax, physical properties, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOBĚRSKÝ, F. *Optimalizace výroby voskových modelů - voskové směsi a jejich zkoušení.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 41 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Optimalizace výroby voskových modelů - voskové směsi a jejich zkoušení* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 28. 5. 2010 …….

Jméno a příjmení bakaláře

PODĚKOVÁNÍ, MOTTO

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

OBSAH

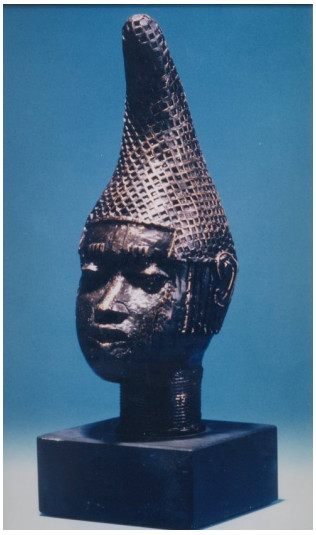
ÚVOD **9**
1 PŘESNÉ LITÍ METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU **10**
1.1 VÝVOJ VYTAVITELNÉHO MODELU VE SVĚTĚ ZA POSLEDNÍ ROKY 11
2 VOSKOVÉ SMĚSI **14**
2.1 FÁZOVÉ ZMĚNY VOSKU 14
2.2 MODERNÍ SMĚSI 15
2.2.1 Parafínové vosky 15
2.2.2 Mikrokrystalické vosky 15
2.2.3 Pryskyřice 16
2.2.3.1 Uhlovodíkové pryskyřice 16
2.2.3.2 Syntetické pryskyřice 16
2.2.3.3 Přírodní pryskyřice 16
2.2.4 Organické plnící materiály 17
2.3 TŘÍDĚNÍ VOSKŮ 17
2.3.1 Modelové vosky 17
2.3.1.1 Přímé (neplněné) modelové vosky 17
2.3.1.2 Plněné modelové vosky 18
2.3.1.3 Emulzifikované modelové vosky 18
2.3.2 Regenerované a rekonstituované vosky 19
2.3.2.1 Regenerace 19
2.3.2.2 Rekonstituce 20
2.3.3 Speciální vosky 21
3 ZKOUŠENÍ VOSKŮ **22**
3.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI 22
3.1.1 Bod tavení (drop melt point) 22
3.1.2 Bod tuhnutí (congealing point) 24
3.1.3 Penetrace 25
3.1.4 Popelnatost 27
3.1.5 Množství vody ve vosku 28
3.1.6 Viskozita 29
3.1.7 Tečení vosku při vstřikování 30
3.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI 31
3.2.1 Rozlišovací skenovací měření tepla (DSC) 31
3.2.2 Infračervená spektroskopie (FTIR) 32
3.2.3 Soudržnost břečky 33
ZÁVĚR **34**
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY **35**
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK **38**
SEZNAM OBRÁZKŮ **39**
SEZNAM GRAFŮ **40**
SEZNAM TABULEK **41**

ÚVOD

Technologie vytavitelného modelu (v originále „lost wax“ nebo „investment casting“) je ve světě známa už několik tisíciletí, ale za posledních více jak padesát let se tato metoda velice zdokonalila a zaujímá ve světě moderní slévárenské technologie jednu z předních pozic. Slévači se v této technologii snaží o výrobu odlitku, který je svou přesností velmi blízko již hotovému výrobku („near-net-shape“). Pro odběratele je vytavitelný model velice efektivní a ekonomická metoda, protože se u hotového odlitku nemusí využívat přílišného závěrečného opracování a používat příliš drahých materiálů a energií.

V dávné historii se tato metoda využívala k výrobě různých ozdob a nástrojů. Vznik vytavitelného modelu se datuje do dob již dávno zaniklých národů a kultur (Mezopotámie, Egypt, Palestina, Persie atd.). Na obr. č. 1 můžeme vidět bronzovou hlavu z 12. století n. l. z Beninu a zlatý hřeben ze 4. století před n. l. z oblasti Dněpru. Z raného novověku je spousta důkazů využití voskového modelu v době Italské renesance. Jako vosk sloužil vosk včelí, na který byla nanesena vhodná hlína a tak byla vyrobena forma. Také pomocí hliněných jader si lidé vyráběli duté nádoby, jako byly například vázy.

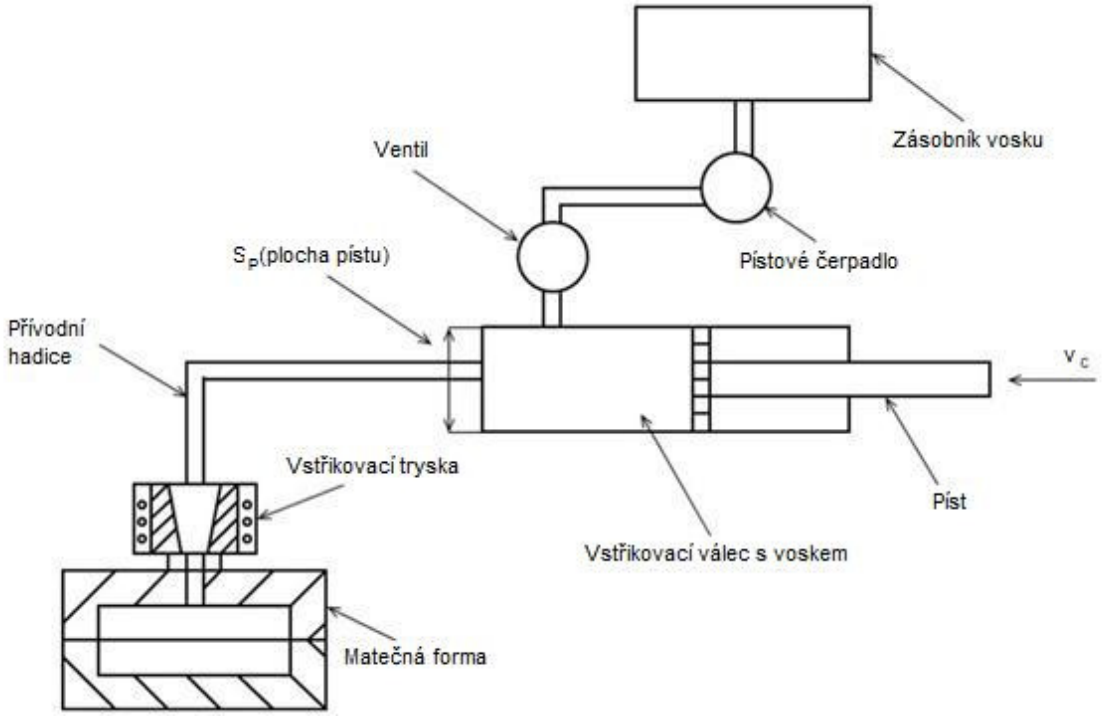
V současné době má tato technologie veliké zastoupení ve světovém průmyslu a to především v průmyslu leteckém, automobilovém, ve zdravotnictví a spoustě dalších odvětvích.



Obr. č. 1 – Příklady historických odlitků [27]

1 PŘESNÉ LITÍ METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU

Postup výrobního procesu je zobrazen na obr. č. 3. Při metodě vytavitelného modelu se pomocí vstřikolisu (viz. Obr. č. 2) vstřikuje do mateční formy vosk a vytvoří se voskový model (1). Mateční formy jsou převážně kovové a vyrábějí se obráběním, odléváním, galvanoplasticky nebo metalizováním. Voskový model může být zhotoven gravitačním litím, ze zvýšeného tlaku (0,5 – 1 MPa) nebo za vysokého tlaku (2,5 – 5 MPa).



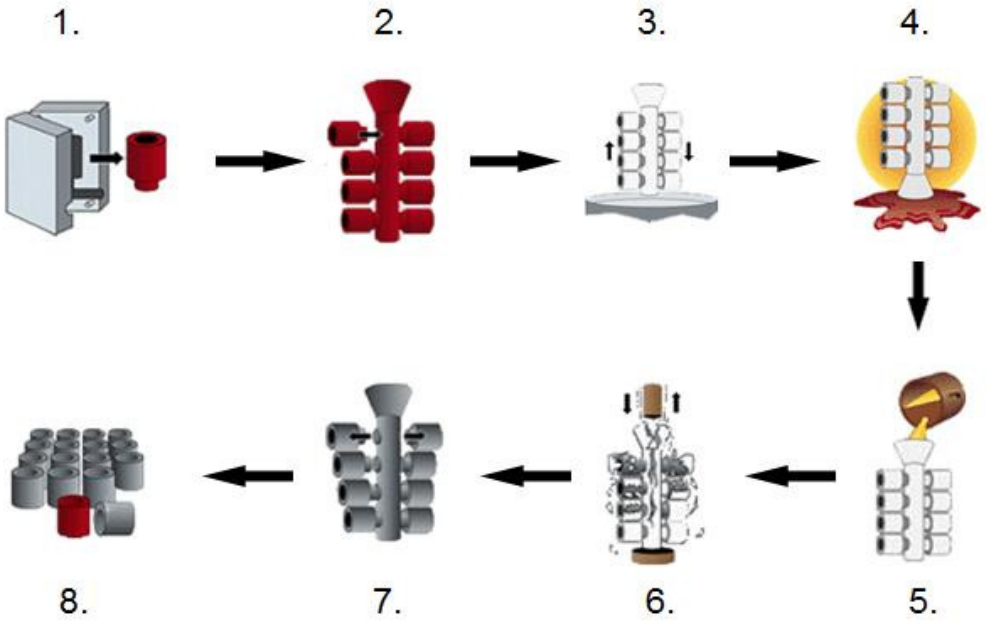
Obr. č. 2 – Zařízení na výrobu modelů – Vstřikolis [28]

Po vyzrání voskového modelu (min. 24 hodin) se drobnější modely sestavují do stromečků pomocí pájení nebo lepení (2). Vtoková soustava se vyrábí z regenerovaného vosku, nikoliv z vosku nového – panenského.

Dále se stromeček namáčí do obalové břečky (3). Ta obsahuje pojivo (alkoholy a hydrosoly) a plnivo (nejčastěji křemenná moučka). Po okapání se na model nanáší ostřivo, buď fluidním, nebo sprchovým způsobem. Dále se jednotlivé obaly suší na vzduchu nebo působením plynného činidla.

Vytavování modelové hmoty (4) se provádí za zvýšené teploty (min. 750 °C a následné žíhání na 900 – 1 000 °C) nebo za nízké teploty (vroucí voda, pára, teplý vzduch). Při vy-

tavování je důležité, aby se vytvořila dilatační spára (na hranici model-forma). Keramická skořepina dilatuje oproti modelu méně a pomaleji.



Obr. č. 3 – Výrobní proces [14]

Odlévání (5) se provádí na vzduchu nebo ve vakuu a do žhavých forem (700 – 800 °C) nebo do studených forem, mající pokojovou teplotu. Křemenné formy nelze použít jako studené, protože hrozí její popraskání při chladnutí.

Následují dokončovací operace (6-8), tj. odstranění skořepiny a tryskání povrchů odlitků, které se před touto operací odstraní od vtokové soustavy, většinou odřezáním [27].

1.1 Vývoj vytavitelného modelu ve světě za poslední roky

Tabulka 1 – Rozložení zisku z prodeje ve světě

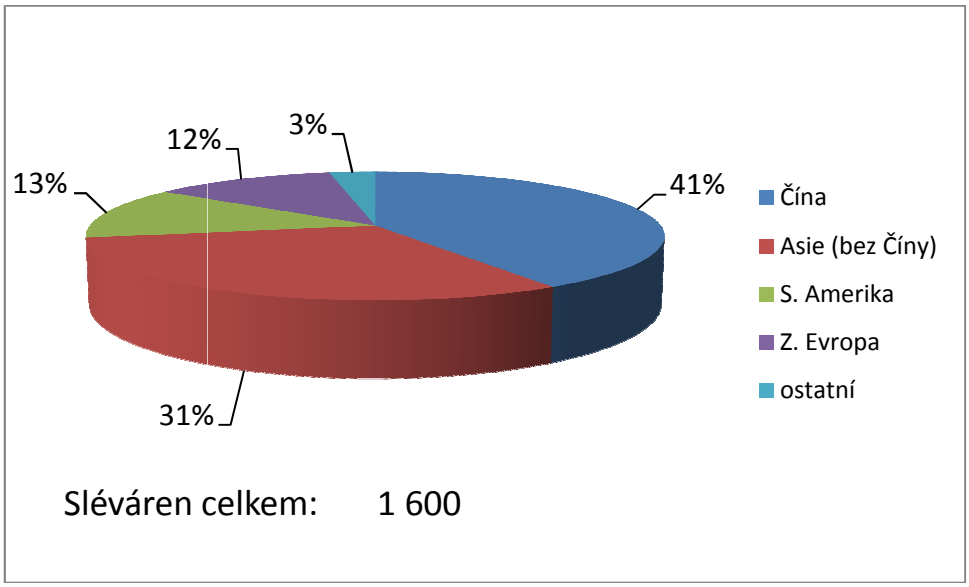
	2004	2005	2006	2007	2008	2009
S. Amerika	50 %	43 %	41 %	37 %	39 %	38 %
Evropa	23 %	22 %	23 %	28 %	27 %	26 %
Asie	11 %	11 %	9 %	13 %	13 %	12 %
Čína	14 %	22 %	25 %	20 %	20 %	22 %
ostatní	2 %	2 %	2 %	2 %	1 %	2 %

Zdroj: EICF konference v letech 2005 až 2010 [20, 21, 22, 23]

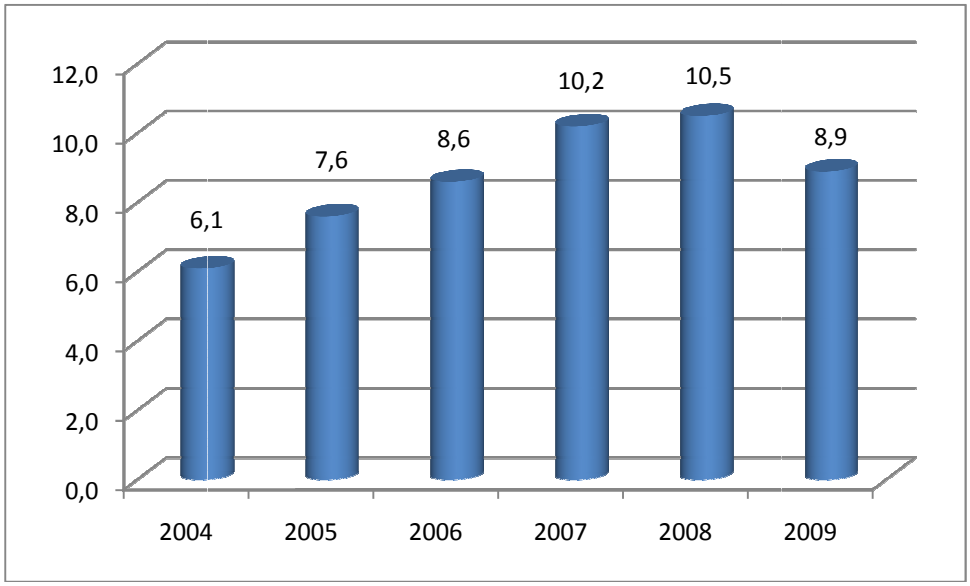
Z tabulky 1 lze vypozorovat, že za posledních šest let se zisk z prodeje na Evropském kontinentu pomalu vyrovnává Severní Americe. Velkou měrou se do světové výroby vosko-

vých modelů také dostává i Čína, která má k roku 2008 celkem 550 sléváren. Ve světě je známo okolo 1 600 sléváren. Procentuální zastoupení sléváren je uveden v grafu 1.

Graf 1 – Distribuce sléváren ve světě [22]



Graf 2 – Zisk z prodeje ve světě (v miliardách US $)

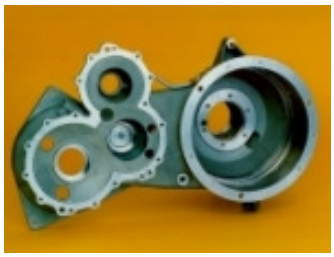


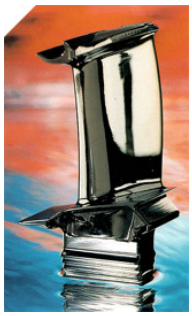
Zdroj: EICF konference v letech 2005 až 2010 [20, 21, 22, 23]

Z grafu 2 lze vyčíst, jak velký vliv měla celosvětová ekonomická krize. Čistý zisk poklesl na úroveň totožnou s rokem 2006. Vysoké ceny surových materiálů způsobily vysoké náklady na výrobu ve slévárnách.

Metoda voskového modelu se výborně uplatňuje v:

- Letectví
- Automobilový průmysl
- Lékařství
- Energetika
- Lodní průmysl
- Zbrojní průmysl
- Potravinářství
- další





Obr. č. 4 – Ukázky modelů odlité metodou vytavitelného modelu [29]

2 VOSKOVÉ SMĚSI

Voskové modely se zhotovují z voskových směsí (viz. Obr. č. 5), protože samostatný vosk nesplňuje všechny požadavky kladené na modelovou hmotu. Moderní voskové směsi jsou sloučeniny více komponentů, jako je syntetický vosk, parafínový vosk, esterový vosk atd. Existuje více variant takových sloučenin, které splňují požadavky; vlastnosti kladené na voskové směsi, jako je bod tavení, tvrdost, viskozita atd. [3].

Vosk je nejstarší termoplastický materiál. Již ve starověkých civilizacích v Číně a Egyptě byl včelí vosk používán řemeslníky pro vytavitelný model a šlo především o umělecké předměty. Dříve se voskem nazýval pouze včelí vosk, ale nyní se název „vosk“ vztahuje k jakékoliv látce mající vlastnosti jako vosk.

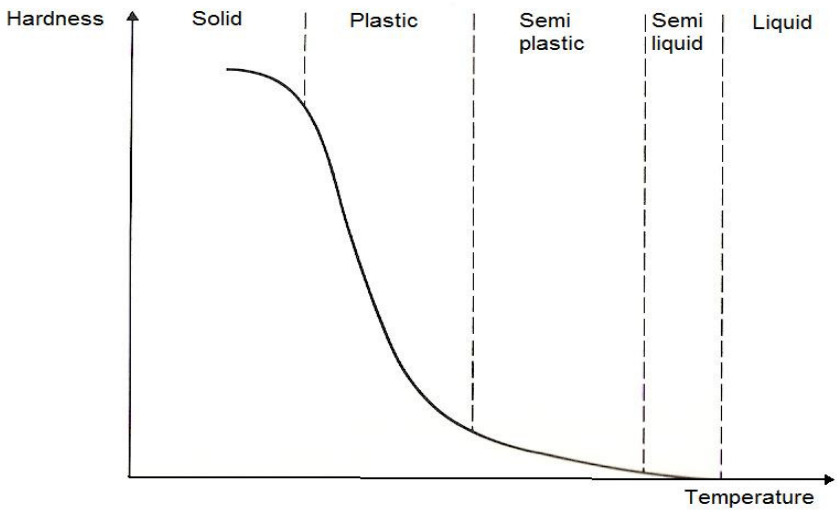
Volba vosku je ve slévárenství velmi důležitá, protože pokud je špatný model, pak odlitek bude taky špatný.

Obr. č. 5 – Voskové směsi

2.1 Fázové změny vosku

Na rozdíl od homogenních chemických sloučenin, vosk se netaví okamžitě při zahřátí, ale prochází několika přechodnými stavy, které jsou uvedeny v grafu 3.

Graf 3 – Fázové změny ve voscích [1]



2.2 Moderní směsi

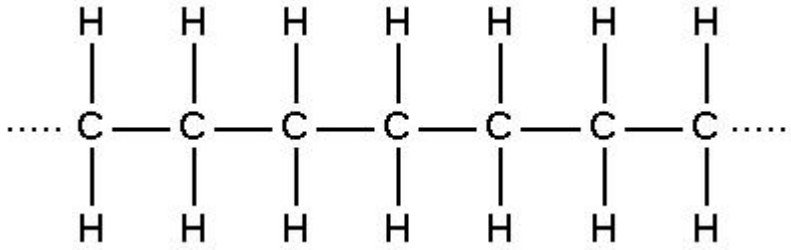
Moderní směsi jsou komplexní sloučeniny obsahující množství složek:

- Parafínové vosky
- Mikrokrystalické vosky
- Přírodní esterové vosky
- Syntetické vosky
- Pryskyřice
- Organické plnící materiály
- Vodu

2.2.1 Parafínové vosky

Parafín je bílá krystalická směs vyšších nasycených alifatických uhlovodíků (alkanů). Je směs pevných uhlovodíků řady C_nH_{2n+2} [11].

Struktura parafínových vosků (viz. Obr. č. 6) se skládá z krátkých přímých řetězců molekul 20 – 36 atomů uhlíku a molární hmotnost, závislá na množství uhlíku, je 300 až 500 g.mol^{-1}. Typické tavicí rozhraní je v rozmezí 32 °C až 66 °C.

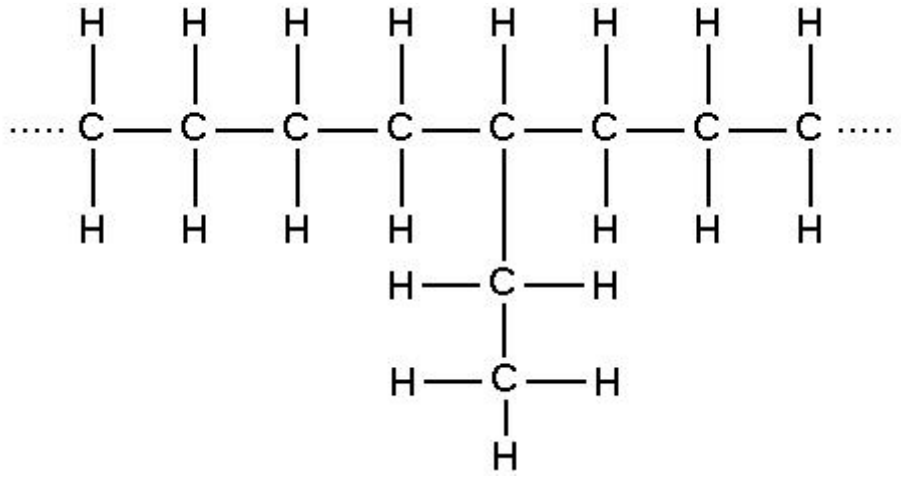


Obr. č. 6 – Typická struktura parafínových vosků

2.2.2 Mikrokrystalické vosky

Mikrokrystalické vosky jsou vosky, vyráběné petrochemicky. Na rozdíl od parafínových vosků se mikrokrystalické vosky skládají z rozvětvených uhlovodíků a jejich krystaly jsou mnohem jemnější. Jejich typickou strukturu můžeme vidět na obr. č. 7.

Struktura se skládá z větví uhlovodíkových molekul obsahujících 31 – 50 uhlovodíkových atomů a molární hmotnost je 450 – 700 g.mol^{-1} v závislosti na množství uhlíku. Teplota tavení je taky vyšší, a to v rozmezí 60 °C až 93 °C.



Obr. č. 7 – Typická struktura mikrokrystalických vosků

2.2.3 Pryskyřice

Existují tři základní druhy pryskyřic používaných ve voscích pro přesné lití a každá z nich má své unikátní vlastnosti. Jsou to: uhlovodíkové pryskyřice, syntetické pryskyřice a přírodní pryskyřice.

2.2.3.1 Uhlovodíkové pryskyřice

Pryskyřice, které jsou vyráběny petrochemicky, a které mají komplexní přímé a větvené řetězce a kruhové struktury. Molární hmotnost je v rozmezí 390 až 1 615 g.mol^{-1} a bod měknutí je mezi teplotami 18 °C a 178 °C. Příklady uhlovodíkových pryskyřic jsou např.: hydrogenované, alifatické, aromatické a čisté monomery.

2.2.3.2 Syntetické pryskyřice

Jde o kompletní směs organických sloučenin. Opět mají komplexní přímé a větvené řetězce a kruhové struktury. Molární hmotnost je od 350 – 1 750 g.mol^{-1} a bod měknutí od 80 °C do 180 °C. Typické syntetické pryskyřice jsou: modifikované pryskyřice, polymerizované pryskyřice a pryskyřičné estery.

2.2.3.3 Přírodní pryskyřice

Přírodní pryskyřice je komplexní směs organických sloučenin. Jsou to komplexní přímé a větvené řetězce a kruhové struktury. Bod měknutí je mezi teplotami 80 °C až 180 °C. Molární hmotnost se pohybuje mezi 250 až 1 575 g.mol^{-1}. Příkladem jsou modifikované pryskyřice, hydrogenované, polymerizované a kysele modifikované pryskyřičné estery.

2.2.4 Organické plnící materiály

Všechny plnící materiály použité v moderních voscích pro přesné lití jsou inertní a nereagují chemicky s jakýmikoliv složkami voskových směsí.

Typy plniv užívaných ve voscích pro přesné lití:

- Zesítěný polystyren (XLPS)
- Zesítěný akrylát (XLA)
- Kyselina tereftalová
- Bisfenol A
- Voda

Plniva jsou používána ke zlepšení vlastností vosku např. ke snížení kavitace v silných částech formy a ke zvýšení tekutosti nebo ke zlepšení kvality povrchu ztuhlého vosku.

2.3 Třídění vosků

K výrobě voskových modelů existuje několik druhů voskových směsí lišící se použitelností a vlastnostmi:

- Modelové vosky – přímé (neplněné), plněné, emulzifikované
- Vosky na vtoky
- Regenerované a rekonstituované vosky
- Vodou rozpustné vosky
- Ostatní speciální vosky – máčecí, opravovací, lepivé

2.3.1 Modelové vosky

2.3.1.1 Přímé (neplněné) modelové vosky

Základní vlastnosti:

- Přímé vosky jsou používány hlavně pro proces přesného lití.
- Představují skvělé vlastnosti, které můžou být přizpůsobeny podle požadavků zákazníka.
- Přímé vosky mohou být vstřikovány za všech možných voskových tlaků.

- Možnost vstřikování v širokém teplotním rozsahu.
- Jsou relativně lehce recyklovatelné.

Výhody:

- Skvělé vstřikovací vlastnosti.
- Poskytují celkový kvalitní povrch voskového modelu.
- Nízká popelnatost.
- Přímé vosky mohou být regenerovány a rekonstituovány.

2.3.1.2 Plněné modelové vosky

Základní vlastnosti:

- Plněný vosk je nejpoužívanější typ vosků pro výrobu tenkostěnných modelů o vysoké kvalitě.
- Představují skvělé vlastnosti, které můžou být přizpůsobeny podle požadavků zákazníka.
- Plněné vosky mohou být vstřikovány za všech možných voskových tlaků.

Výhody:

- Skvělé vstřikovací vlastnosti.
- Poskytují celkový kvalitní povrch voskového modelu.
- Skvělá délková přesnost.
- Plniva poskytují velkou stabilitu a redukují kontrakci a kavitaci.
- Nízká popelnatost.
- Díky recyklační technologii mohou být regenerovány a rekonstituovány.

2.3.1.3 Emulzifikované modelové vosky

Základní vlastnosti:

- Emulzifikované vosky nabízejí výborné vlastnosti pro výrobu voskových modelů.
- Využití vody jako plniva (7 – 12 %) se redukuje kavitace.

- Poskytují skvělé vlastnosti.
- Možnost vstřikování v širokém teplotním rozsahu.

Výhody:

- Skvělé vstřikovací vlastnosti.
- Povrch je skelně hladký.
- Voda zaručuje vyšší délkovou stabilitu a nižší kavitaci.
- Nízká popelnatost.
- Díky recyklační technologie mohou být emulzifikované vosky regenerovány a rekonstituovány.

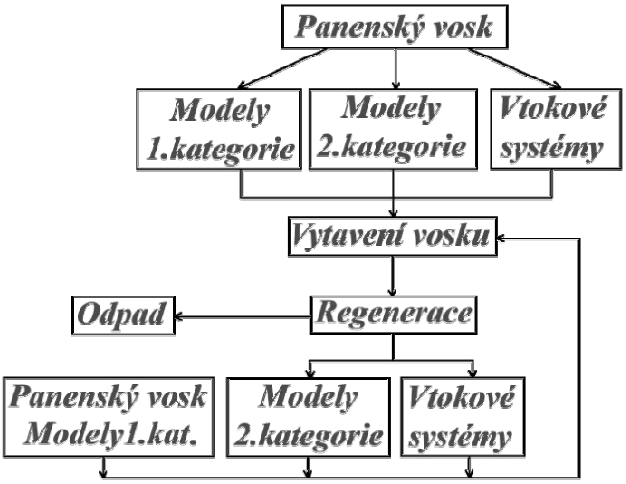
2.3.2 Regenerované a rekonstituované vosky

Hospodaření a ekologické trendy vedly k tomu, že obnova vosků patří k podstatné části obchodní činnosti dodavatelů. Dříve to byla pouze výhodná ekonomická alternativa pro výrobu vtoků a nálitků. Dnes mají regenerované vosky stejné vlastnosti jako panenské vosky [8].

2.3.2.1 Regenerace

Nejčastější způsoby regenerace jsou: sedimentace (nejstarší), filtrace a odstředivý způsob.

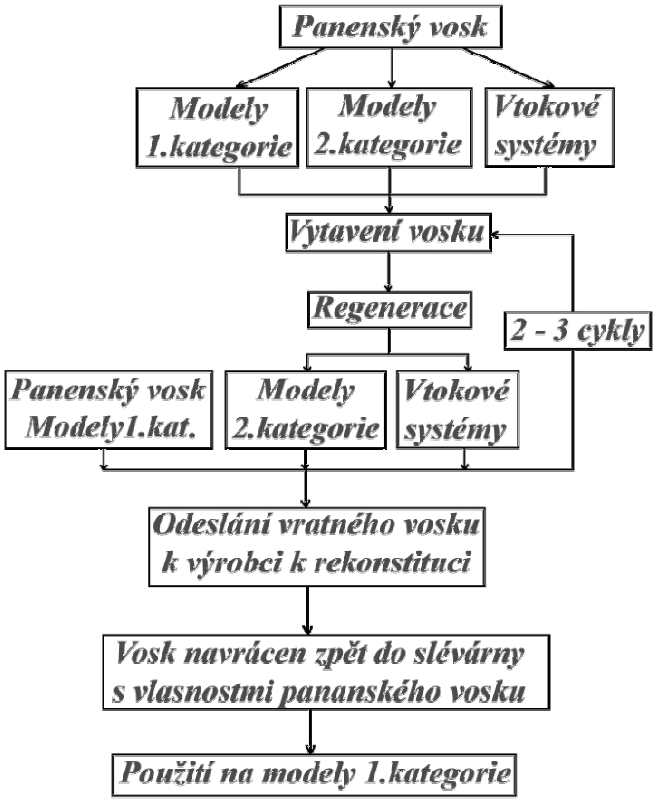
- Sedimentace – Vosk se roztaví a voda, nečistoty a plnivo se usadí na dně, protože mají větší hustotu. Po určité době se vosk odlije a znovu použije. Nevýhodou je časová náročnost.
- Filtrace – Využívá se filtračního lisu, do kterého se lije vosk přes textilii. Plnivo a nečistoty se usadí na látce (filtrační kůra), a následně se podle předpisů zlikvidují.
- Odstředivý způsob – Používá se, pokud je ve voscích větší množství plniva. Směs se nalije do vysokorychlostní centrifugy a částice s větší hustotou, než má vosk, se oddělí. Částice s podobnou hustotou zůstanou, což znamená, že při odstředivém způsobu ve vosku zůstane větší množství popelovin, než při způsobu filtračním.



Obr. č. 8 – Regenerace vosku [8]

2.3.2.2 Rekonstituce

Jde o proces, při kterém se použité vosky vyčistí a zbaví nečistot a následně se smíchají s plnivy a uvede se do původního stavu. Dodávají se opět do sléváren a jsou znovu použity na vtokové soustavy a modely.



Obr. č. 9 – Rekonstituce vosku [8]

2.3.3 Speciální vosky

- Měkký opravovací vosk
- Tvrdý opravovací vosk
- Lepivý vosk
- Hluboce těsnící vosk
- Řetězový vosk
- Vodou rozpustný vosk

3 ZKOUŠENÍ VOSKŮ

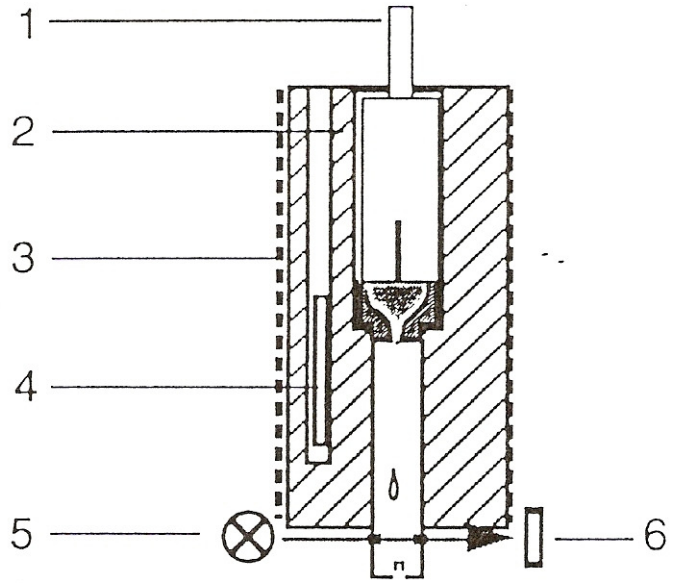
Vosky používané pro přesné lití jsou komplexní směsi různých součástí jako pryskyřic, mikrokrystalických vosků, tuhých parafínů a dalších přísad. Všechny přísady ve finální směsi vosku nebo produktu hrají roli při určování výsledných vlastností. Výrobci vosku musí charakterizovat právě tyto vlastnosti.

3.1 Fyzikální vlastnosti

3.1.1 **Bod tavení** (drop melt point)

Bod tavení je definován teplotou, při které první kapka roztaveného voskového vzorku za pomalého zahřívání vyteče z pohárku pro jeho testování.

Tohle měření je možné, pouze pokud má vzorek nízkou viskozitu za zvýšené teploty, aby mohl protéct skrz 2,8 mm široký otvor: jako jsou tuky, parafíny, vosky, lubrikační mazivo a nekrystalické substance jako je přírodní pryskyřice.



Obr. č. 10 – Přístroj pro měření bodu tavení [15] – (1) náboj s šálkem o průměru 2,8 mm, (2) tělo přístroje o teplotě T_C, (3) elektrické topení, (4) teplotní senzor, (5) zdroj světla, (6) fotobuňka

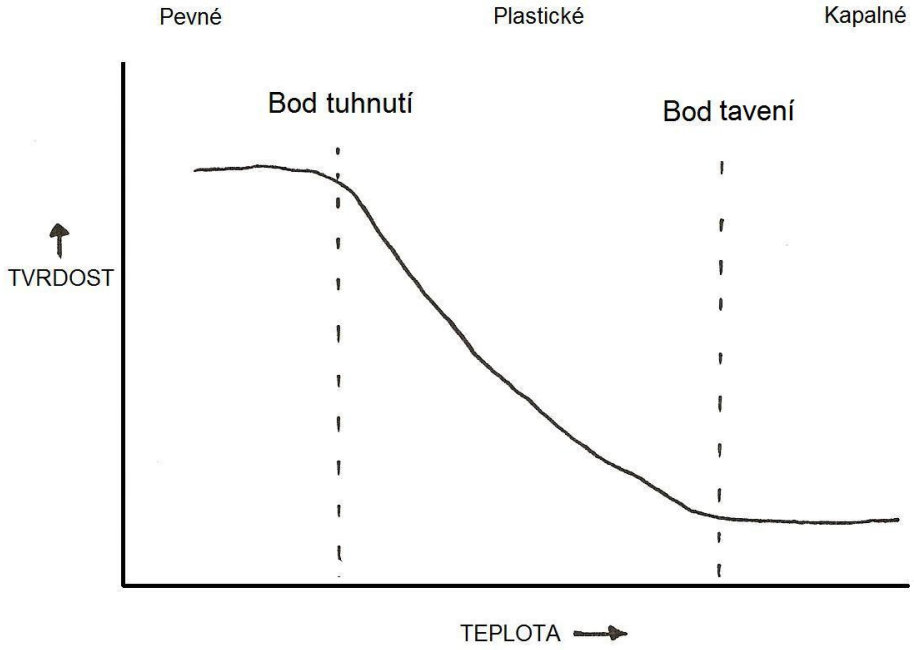
- **Příprava vzorku:**

Příprava vzorku je velmi důležitá část určení bodu tavení.

Jedlé tuky, např. v plechovkách v různých krystalických modifikacích mají rozdílné body tání. Pro získání srovnatelných hodnot, musíme vzorky předtavit.

Bod tavení vzorku je měřen a zaznamenáván při stoupající teplotě a bod tuhnutí vzorku zase při klesající teplotě.

Graf 4 – Závislost bodu tuhnutí a bodu tavení na fázi vosku [15]



- **Vybavení:**

METTLER FP90 (centrální procesor), FP 83 pohárek, 10 gramů voskového vzorku.

- **Postup:**

Umístíme vzorek do ohřívače a budeme jej ohřívat, dokud se vzorek neroztaví. Stejně tak zahřejeme i pohárek. Umístíme šálek do kovové nebo skleněné misky a opatrně tam vlijeme roztavený vzorek, dokud nebude šálek plný. Musí být zajištěno zamezení vzniku vzduchových bublin!

Naplněný šálek by se měl chladit půl hodiny. Poté se šálek umístí do odběrové trubice a ta se zahřeje. Začne se ohřívat 20 °C pod předpokládanou teplotou a skončí 20 °C nad předpokládanou teplotou.

- **Výsledky:**

Jakmile bude určena teplota bodu tavení, výsledek měření se zobrazí na displeji přístroje a hodnota je zaokrouhlena na nejbližší celý stupeň Celsia.

3.1.2 **Bod tuhnutí** (congealing point)

Bod tuhnutí vosku je teplota, při které vosk přestane téct pod vlivem gravitace. Na této teplotě se skupenství vosku přeměnění z plastického na pevné a je závislá na celkovém složení vosku.

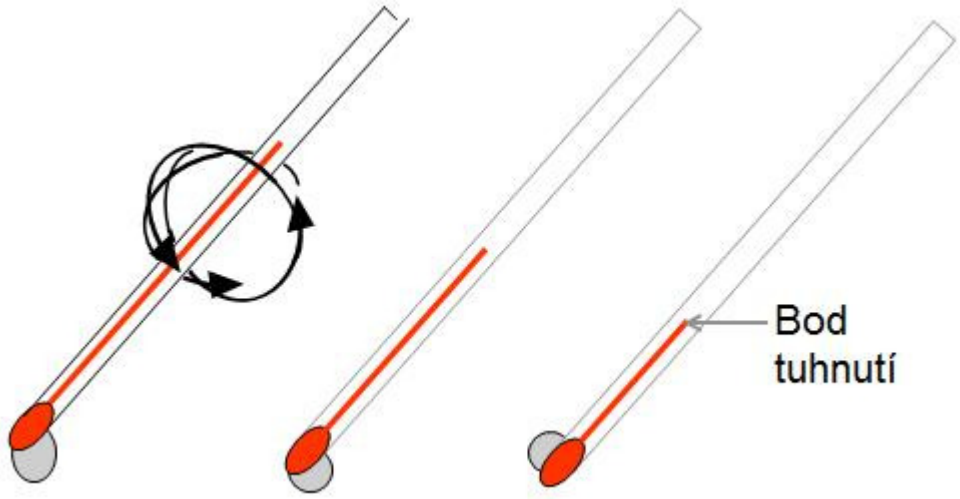
- **Vybavení:**

Kalibrovaný teploměr v rozsahu od 20 °C do 100 °C, 100 ml kádinka, topné médium (elektronický vařič), 100 gramový vzorek, tuba o průměru 35 mm a délce 200 mm, zátka, stojanový kruh a sponky.

- **Postup:**

Vsuneme teploměr do zátky. Když zátku upevníme do tuby, špička teploměru bude zhruba 10 až 15 mm nad dnem tuby. Po provedené úpravě vyjmeme teploměr se zátkou opatrně z tuby, aby se nezměnila pozice zátky a špičky teploměru.

Umístíme voskový vzorek na vařič a budeme ho zahřívat do doby, než vzorek roztaje. Vložíme teploměr do vosku, nesmí se vosk přehřát. Ochladíme vosk na teplotu 20 °C – 30 °C nad bodem tuhnutí a dále ji necháme spadnout o deset stupňů. Vyjmeme teploměr z vařiče s vrstvou vosku na špičce. Umístíme vosk do horizontální roviny a vytvoří se vosková kulička o velikosti 1,5 až 2,5 mm, vložíme teploměr do tuby, která byla zahřána v troubě na teplotu 99 °C ± 3 °C. Udržíme tubu a teploměr v horizontální poloze.



Obr. č. 11 – Princip zjišťování bodu tuhnutí [16]

Během otáčení teploměru a tuby konstantní rychlostí okolo horizontální osy pozorujeme kapku na špičce teploměru. Jakmile se vytvoří pevná kapka na špičce, zaznamená se teplota a provede se nové měření na vzorku. Průměrná hodnota z měření je bodem tuhnutí.

- **Výsledky:**

Záznam průměrné hodnoty je zaokrouhlen na nejbližší čtvrtinu stupně.

- **Přesnost:**

Následující kritéria by se měly použít pro posouzení přijatelnosti výsledků (95% spolehlivost).

- **Opakovatelnost**:

Výsledky od stejného operátora můžou být považovány za nedůvěryhodné, pokud se liší o více, než jsou uvedené hodnoty:

Destilované vosky: 0,5 °C

Zbytkové vosky: 1,0 °C

- **Reprodukovatelnost**

Výsledky ze dvou laboratoří by neměly být nedůvěryhodné, jestliže se neliší o více, než jsou uvedené hodnoty:

Destilované vosky: 1,5 °C

Zbytkové vosky: 2,5 °C

- **Poznámka:**

1. Tento test může být uskutečněn během přípravy vosku pro penetrační test.
2. Pokud jsou při testu zjištěny špatné podmínky, test se opakuje.

3.1.3 Penetrace

Penetrace je vlastně tvrdost vosku a při její zkoušení se měří hloubka díry ve vosku od jehly. Při určitých podmínek se jehla zatíží a pronikne do vosku. Celkový výsledek je měřen v desetinách milimetru. Vzorek s vysokou penetrací bude měkčí než vzorek s menší penetrací a tvrdost vosku má vliv na jeho celkovou pružnost.

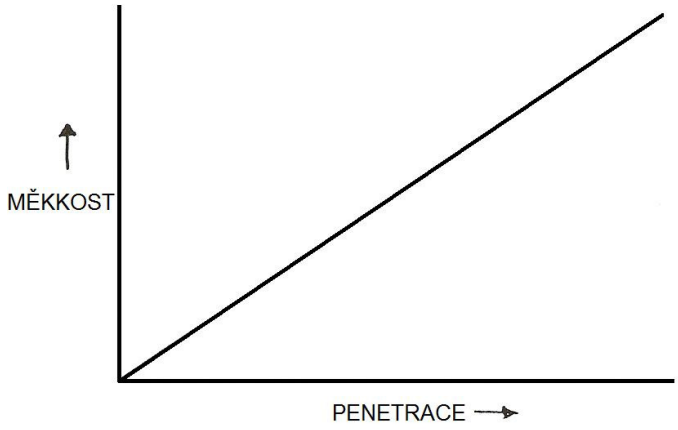
- **vybavení:**

Penetrační miska s plochým dnem schopná udržet 50 gramů vosku, jehla ASTP 1P, penetrační stroj Stanthope Seta s gramáží 200 gramů, vodní lázeň.

- **postup:**

A. 100 gramový vzorek vosku je zahřán na 85 °C až 90 °C pomocí kádinky, a poté je pomalu naléván do předehřáté penetrační misky.
B. Penetrační miska se poté ochlazuje asi dvě hodiny na pokojovou teplotu.
C. Po dvou hodinách je penetrační miska vložena do vodní lázně, která má teplotu 25 °C ± 0,2 °C a je tam ponechána další dvě hodiny.
D. Minimálně po dvou hodinách v lázni vyjmeme misku a umístíme ji pod penetrometr, sjedeme jehlou dole tak, aby se hrot dotýkal voskového vzorku a ručička na stupnici penetrometru ukazuje nulu.
E. Uvolníme jehlu a držíme ji volnou po dobu 5 sekund, zajistíme ji a přečteme hloubku penetrace v desetinách milimetrů.
F. Test se opakuje třikrát a zaznamená se průměrná hodnota penetrace.

Graf 5 – Lineární závislost penetrace na měkkosti vosku [15]



- **výsledky:**

Zápis výsledků je vložen do schématu, ve kterém jsou uvedeny podmínky testu.

200 gramů – 5 sekund – 25 °C

- **poznámky:**

1. Aby vzorky nebyly zaměněny, tak se u značky na povrchu každého zkoušeného penetračního vzorku udá číslo vosku a číslo série.
2. U emulzifikovaných vosků je nutné, aby voda vyvřela ještě před testem, aby nedocházelo k vytváření bublinek páry.

Jestliže je zjištěno, že výsledky nejsou v pořádku, test se provede znovu na originálním vzorku. Umístí se na dvě hodiny do vodní lázně. Pokud ani tento test neuspěje, opakuje se celý test úplně od začátku.

3.1.4 Popelnatost

Tato metoda popisuje proceduru pro určení množství popelu ve voscích, voskových směsích, pryskyřicích a v podobných materiálech, ve kterých se popel nachází. Ten je považován za nevhodnou nečistotu.

- **Definice:**

Množství popela je definováno hmotnostním procentem zbytku po kompletním spálení.

- **Přístroje:**

a) křemíkový nebo porcelánový kelímek o kapacitě od 90 do 120 ml
b) elektrická muflová pec schopná udržet teplotu 1000 °C ± 25 °C
c) chladící nádrž, elektrická laboratorní váha schopná vážit s přesností 0,1 mg, Bunsenův hořák

- **Postup:**

Zahřejeme porcelánový kelímek v peci na teplotu 700 až 800 °C minimálně na deset minut. Ochladíme na pokojovou teplotu v přenosné chladící nádrži a zvážíme. Vážíme třikrát a zaznamenáme průměrnou hodnotu.

Přidáme do kelímku 10 gramů vzorku a zvážíme kelímek dohromady se vzorkem a ze tří vážení zaznamenáme průměrnou hodnotu. Poté budeme zahřívat kelímek Bunsenovým hořákem do té doby, než se obsah vznítí. Spálí se uhlík a zůstane z něj popel.

Umístíme kelímek se zbytkem vosku do muflové pece o teplotě 950 °C ± 25 °C. Necháme ho tam, dokud nezmizí všechny uhlíkaté materiály (asi 1 hodinu). Poté vytáhneme kelímek z pece a ochladíme jej v chladící nádrži na pokojovou teplotu. Provedeme tři vážení a zaznamenáme průměrnou hodnotu.

- **Poznámka:**

Emulzifikované vosky obsahují vodu a ta musí vyvřít ještě před vážením.

- **Výsledky:**

Výpočet hmotnosti popelu ve vzorku v procentech:

$$M_A = \frac{w}{W} \cdot 100 \quad [\%] \tag{1}$$

Korekce vody pro emulzifikované vosky:

$$M_{A,v} = \frac{w}{W^*} \cdot 100 \quad [\%] \tag{2}$$

$$W^* = \frac{W \cdot 100}{100 - W_v} \quad [\%] \tag{3}$$

- **Dovolené množství:**

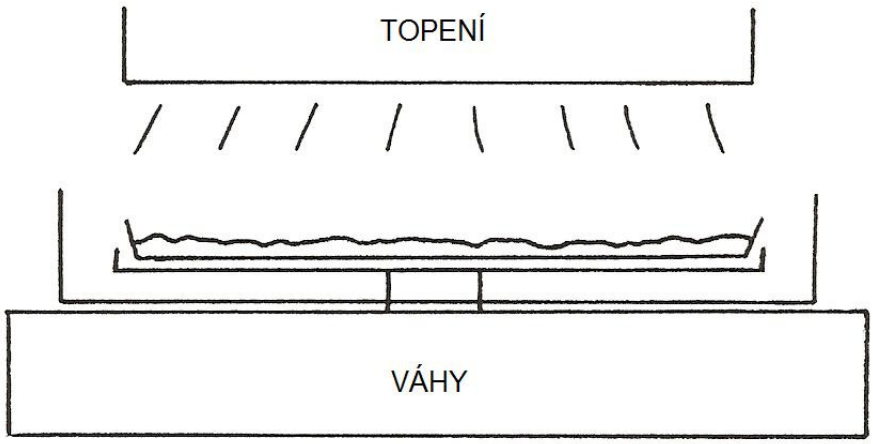
Všechny vyrobené panenské vosky nesmí mít více jak 0,05 % popelu.

- **Poznámka:**

Pokud je nalezen nějaký vzorek, který má více popelu, než je dovolené, tak test se musí opakovat. Kelímek se předehřeje na teplotu 1 000 °C po dobu asi 20 minut a ještě předtím se zváží jeho hmotnost. Potom se zchladí a po kompletním spálení znovu zváží.

3.1.5 Množství vody ve vosku

Vodní test je prováděn užitím vlhkostního analyzéru. Malé množství vosku je umístěno na váhy uvnitř analyzéru vlhkosti, které je následně zváženo. Zahříváním se vosk roztaví a odpaří se určité množství vody a celková hmotnost vosku se zredukuje. Váhy monitorují ztracenou váhu, a jakmile se hmotnost ustálí, cyklus ohřívání se zastaví. Ztracená hmotnost se vypočítá v procentech a je uvedena ve vztahu (4).



Obr. č. 12 – Zjišťování množství vody ve vosku [15]

- **Výpočet:**

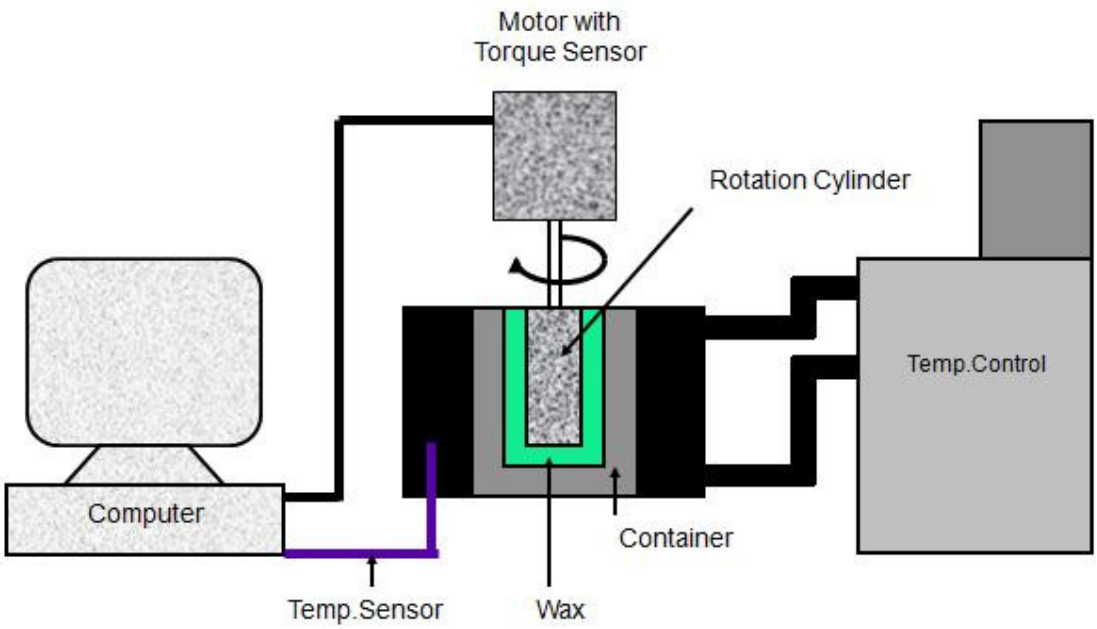
$$M = \frac{w_i - w_f}{w_i} \cdot 100 \quad [\%] \tag{4}$$

3.1.6 Viskozita

Viskozita je měření změny tekutosti vosku v závislosti na teplotě. Je důležité znát viskozitu vosku, protože poskytuje dobré zobrazení charakteristik tečení, které je důležité během vstřikování a vytavování. Vosk se zahřeje na teplotu 80 °C a je považován za stabilní. Poté se nalije do kontejneru. Následně se teplota dále snižuje motorem, který má konstantní hodnotu smyku. Momentový senzor měří potřebnou sílu pro udržení konstantní rychlosti motoru. Když je vosk ochlazen silou konstantní rychlosti, tak viskozita roste a počítač zpracovává data, která jsou poté zobrazena do grafu.

Obr. č. 13 – Příklady tekutin o různé viskozitě [17]

Viskozita voskového vzorku v závislosti na teplotě, dá se říct, že exponencionálně klesá.

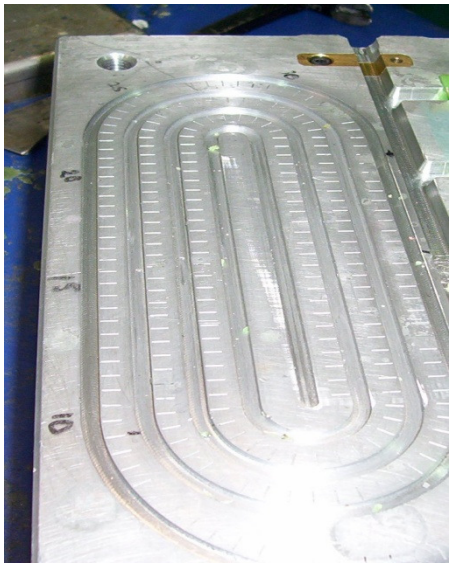


Obr. č. 14 – Schéma přístroje pro měření viskozity [16]

3.1.7 Tečení vosku při vstřikování

Je to kvantitativní metoda na určení tekutosti nebo proudových charakteristik vosku ve chvíli, kdy vstupuje do formy. Typicky je vosk vstřikován do specielní spirálové formy známých parametrů (teplota, tlak, průtoková rychlost, čas, atd.). Značky vyryté do formy zobrazí, jak daleko vosk doputoval. Více tekutý vosk procestuje delší cestu v dutině formy.

Faktory ovlivňující tečení vosku: teplota vzduchu, teplota formy, geometrie dutiny, vstřikovací tlak a teplota, bod tuhnutí, viskozita atd.



Obr. č. 15 – Forma pro zjištění velikosti tečení vosku [18]

3.2 Mechanické vlastnosti

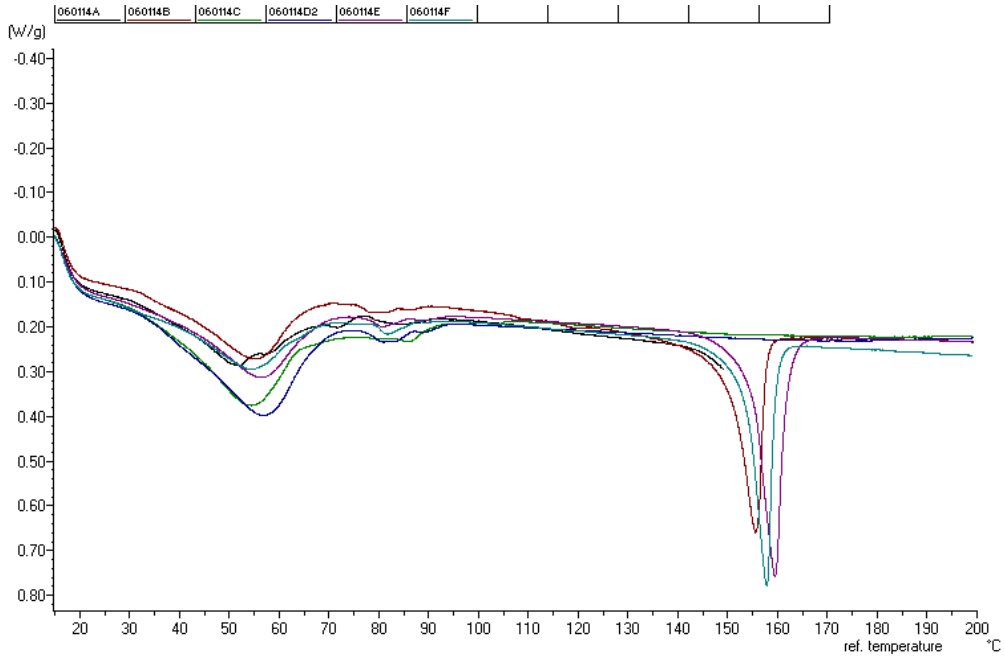
Vosky mají vhodné mechanické vlastnosti pro jejich zpracování. Například jsou tvrdé, křehké, ale můžou být i náchylné k poškození v průběhu sestavování do stromečku. Vosk, který je příliš měkký a ohebný nemusí poskytovat dostatek pevnosti během výroby skořápky modelu.

Používá se např. technika tříbodového ohýbání k testování mechanických vlastností. Ručně lité nebo vstřikované zkušební tyče jsou ohýbané na tlakovém a tahovém stroji za regulovaných podmínek. Počítačem se zaznamenávají numerická a grafická data, která charakterizují zkoušený materiál.

3.2.1 Rozlišovací skenovací měření tepla (DSC)

Jde o techniku, která dovoluje uživateli sbírat informace o teplotních charakteristikách voskových směsí. DSC měří proudění tepla dovnitř a ven ze vzorku při změnách teploty. Různé součásti se smísí, během testu se taví a zmrazují při různých teplotách, takže se tepelný tok mění s teplotou. Naměřený tepelný tok v závislosti na teplotě vygeneruje charakteristickou křivku pro zkoušený materiál. Pouze vosky a nějaké polymery jsou citlivé na teplotní změny v krystalických složkách ve směsi. Amorfní materiály, jako pryskyřice, negenerují dosti silné signály.

Graf 6 – Příklady DSC křivek pro různé typy vzorků [18]



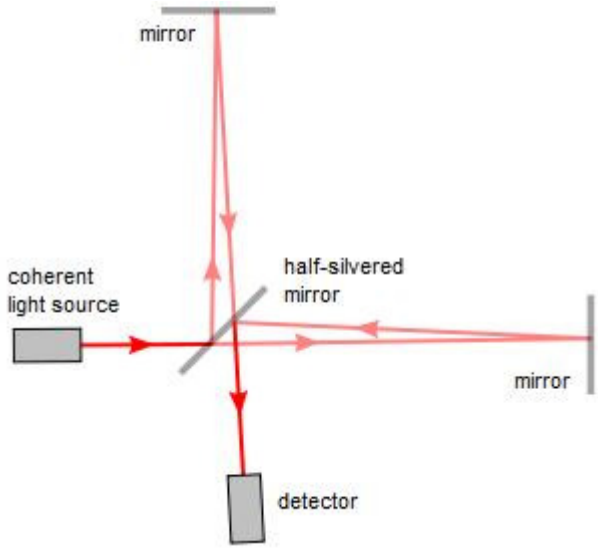
Metoda DSC je také schopná měřit další teplotní vlastnosti, například měrné teplo.

3.2.2 Infračervená spektroskopie (FTIR)

Infračervená spektroskopie je analytická metoda určená především pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin a také pro stanovení anorganických látek. Tato technika měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným vzorkem. [9]

Metoda je založena na absorpci infračerveného záření při průchodu vzorkem, při které proběhnou změny rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Výsledné infračervené spektrum je funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmitance (T) nebo jednotkách absorbance (A) na vlnové délce dopadajícího záření. [12]

Pozn.: *Interferometr – přístroj pro měření fyzikálních veličin, délek ap., na základě interference záření* [13].



Obr. č. 16 – Schéma interferometru [19]

Infračervené světlo svítí skrz tenkou vrstvu vosku při zkoušení. Chemické skupiny uvnitř vosku absorbují některá světla při charakteristické frekvenci. Porovnání spektra ze směsi se známými standardními spektry může pomoci k identifikaci neznámé součásti nebo kontaminující látky.

Technika může být taky užitá k určení úrovně přísad - například polymerů a antioxidantů.

3.2.3 Soudržnost břečky

Vosky mají rozdílné charakteristiky povrchového napětí, které pomáhají zjišťovat schopnost primární břečky k tomu, aby se lepila na vosk. Dobrá soudržnost je zvláště důležitá, aby se zabránilo ohýbání, odlamování a zdvíhání primárního obalu. Různí činitelé jako například typ plniva, velikost zrn atd., hrají důležitou roli v soudržnosti břečky na voskový model. Test zahrnuje namáčení nečistých voskových kusů do břečky a poté se dávají sušit. Panenka je poté obalena primární vrstvou obalu a soudržnost nebo síla je měřena v různých časech. Lepší primární soudržnost břečky vyžaduje větší sílu k jejímu rozbití.

ZÁVĚR

Tématem mé bakalářské práce bylo zaměřit se na rozdělení vosků a voskových směsí a dále jejich zkoušení. Technologie vytavitelného modelu se ve světě uplatňuje díky ekonomickému hledisku. Není potřeba velkého finálního opracovávání, takže se šetří materiál a energie.

V úvodu své práce jsem poukázal na vývoj této metody za posledních několik let z hlediska zisků. A je zřejmé, že ekonomická krize v roce 2008 zapříčinila pokles tržby. Ale protože tato technologie má obrovskou budoucnost, nebude dlouho trvat, aby se toto odvětví vrátilo zpět do starých kolejí, které si razilo strmě vzhůru od přelomu tisíciletí.

Hlavní část bakalářské práce byla věnována samotnému tématu. V první části se jednalo o rozdělení voskových směsí, a tady bych se zastavil u regenerovaných a rekonstituovaných vosků. Toto jsou vosky, které svou možností opětovného zpracování získávají stejné vlastnosti, jako mají nové-panenské vosky a zároveň šetří ekonomiku odběratelů hotových výrobků.

V závěrečné fázi se pojednává o zkoušení fyzikálních a mechanických vlastností vosku. Protože voskových vlastností je široká škála, nešlo se zabývat všemi. Proto jsem se zaměřil na postup jen těch hlavních a důležitých. Výrobci vosků musí právě tyto vlastnosti zjistit a uvést svým zákazníkům.

Jak bylo již v této práci mnohokrát uvedeno, jde o velice rychle se rozvíjející technologii, která má spoustu výhod a velkou budoucnost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] BEELEY, PR. and SMART, RF. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9

[2] NILES, Jeffrey C., ANIBARRO, Marcello, FIELDER, Harvey. Wax characterization for the investment casting process. *Incast*. 2003, no. 3, s. 16-19.

[3] HERMAN, Aleš. *Přesné lití na vytavitelný model* [online]. [s.l.] : [s.n.], 11-11-2007 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <[1] http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>.

[4] HIRST, Richard. *The basic of investment casting wax* [online]. [s.l.] : [s.n.], 4-1-2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl8.pdf>.

[5] BOND, David; NISHIKAWA, Koji. *Investment casting wax technology* [online]. [s.l.] : [s.n.], 4-1-2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>.

[6] HIRST, Richard. *Understanding Investment Casting Wax* [online]. [s.l.] : [s.n.], 4-1-2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl9.pdf>.

[7] HIRST, Richard. *Composition, Control and Use of Investment Casting Wax* [online]. [s.l.] : [s.n.], 28-2-2007 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl14.pdf>.

[8] PUJUKA, Makiki. *Přehled vosků pro přesné lití.ppt*. [s.l.] : [s.n.], 22-4-2006.

[9] *Laboratoř molekulární spektroskopie - VŠCHT Praha* [online]. 5-3-2003 [cit. 2010-04-15]. Infračervená spektroskopie. Dostupné z WWW: <http://lms.vscht.cz/Zverze/Infrared.htm>.

[10] *Waxes* [online]. 200? [cit. 2010-04-15]. Remet. Dostupné z WWW: <http://www.remet.com/waxes.php>.

[11] Parafín In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 10. 12. 2007, 7. 4. 2010 [cit. 2010-04-14]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Parafín>.

[12] FTIR. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 8. 2. 2007, last modified on 4. 4. 2010 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/FTIR>.

[13] *ABZ.cz: slovník cizích slov* [online]. [cit. 2010-04-15]. Pojem interferometr. Dostupné z WWW: <http://slovnik-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/interferometr>.

[14] *Cheng casting* [online]. 200? [cit. 2010-04-15]. Investment casting process. Dostupné z WWW: <http://www.cheng-casting.com/investment-casting-precess.htm>.

[15] *Quality control manual (summary).* [s.l.] : BLAYSON OLEFINES LTD, 200?. 28 s.

[16] HIRST, Richard. *Wax testing and design.ppt*. [s.l.] : [s.n.], 5-8-2003.

[17] *Indium corporation* [online]. 23-6-2008 [cit. 2010-04-15]. Viscometry 101. Dostupné z WWW: <http://blogs.indium.com/blog/ball-attach/0/0/viscometry-101-ball-attach-flux-cone-plate-or-t-bar>.

[18] BOND, David; HANCOCK, Phil. *Http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl13.pdf* [online]. [s.l.] : [s.n.], 13-7-2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl13.pdf>.

[19] Fourier transform spectroscopy. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 21 November 2008, last modified on 28 April 2010 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform_spectroscopy>.

[20] GENTLY, Dirk. *World Investment Casting Markets Review* [online]. [s.l.] : [s.n.], 13-7-2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/ml19.pdf>.

[21] GENTLY, Dirk. *Review od World Investment Casting Markets* [online]. [s.l.] : [s.n.], 21-10-2008 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/ml22.pdf>.

[22] GENTLY, Dirk. *Review od World Investment Casting Markets* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2-2-2010 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/ml30.pdf>.

[23] FORD, David. *Review od World Investment Casting Markets* [online]. [s.l.] : [s.n.], 14-4-2010 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/ml32.pdf>.

[24] WILLIAMS, Ron B. *Product Information - Strainght (Unfilled) Wax* [online]. [s.l.] : [s.n.], 16-10-2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.blayson.com/downloads/straight_wax.pdf>.

[25] WILLIAMS, Ron B. *Product Information - Filled Wax* [online]. [s.l.] : [s.n.], 13-10-2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.blayson.com/downloads/filled_wax.pdf>.

[26] WILLIAMS, Ron B. *Product Information - Emulsified Wax* [online]. [s.l.] : [s.n.], 13-10-2006 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.blayson.com/downloads/emulsified_wax.pdf>.

[27] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno : [s.n.], 2009 [cit. 2010-05-26]. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>.

[28] HORÁČEK, Milan. *Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu* [online]. Brno : [s.n.], 200? [cit. 2010-05-26]. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/vyroba-presnych-modelu.pps>.

[29] HIRST, Richard. *Investment casting : The lost wax process* [online]. [s.l.] : [s.n.], 4-2-2010 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/process2010.pdf>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
DSC		Diferenciální skenovací kalorimetrie (Differential scanning calorimetry)
EICF		Evropská federace přesného lití na vytavitelný model (European investment casting federation)
FTIR		Infračervená spektroskopie (Fourier transform infrared)
M	[%]	množství vody ve vosku
M_A	[%]	množství popelu
$M_{A,v}$	[%]	množství popelu u emulzifikovaných vosků
w	[g]	hmotnost popelu
W	[g]	hmotnost voskového vzorku
W^*	[%]	množství vody
W_f	[g]	finální hmotnost
W_i	[g]	počáteční hmotnost
W_v	[g]	hmotnost vody

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 – Příklady historických odlitků 9
Obr. č. 2 – Zařízení na výrobu modelů – Vstřikolis 10
Obr. č. 3 – Výrobní proces 11
Obr. č. 4 – Ukázky modelů odlité metodou vytavitelného modelu 13
Obr. č. 5 – Voskové směsi 14
Obr. č. 6 – Typická struktura parafínových vosků 15
Obr. č. 7 – Typická struktura mikrokrystalických vosků 16
Obr. č. 8 – Regenerace vosku 20
Obr. č. 9 – Rekonstituce vosku 20
Obr. č. 10 – Přístroj pro měření bodu tavení 22
Obr. č. 11 – Princip zjišťování bodu tuhnutí 24
Obr. č. 12 – Zjišťování množství vody ve vosku 28
Obr. č. 13 – Příklady tekutin o různé viskozitě 29
Obr. č. 14 – Schéma přístroje pro měření viskozity 29
Obr. č. 15 – Forma pro zjištění velikosti tečení vosku 30
Obr. č. 16 – Schéma interferometru 32

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Distribuce sléváren ve světě 12
Graf 2 – Zisk z prodeje ve světě (v miliardách US $) 12
Graf 3 – Fázové změny ve voscích 14
Graf 4 – Závislost bodu tuhnutí a bodu tavení na fázi vosku 23
Graf 5 – Lineární závislost penetrace na měkkosti vosku 26
Graf 6 – Příklady DSC křivek pro různé typy vzorků 31

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Rozložení zisku z prodeje ve světě 11