

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 - PŘEHLED MATERIÁLŮ A ZAŘÍZENÍ

OPTIMIZATION OF WAX PATTERN MANUFACTURE - WAX MIXTURES AND EQUIPMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ KUBÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Kubík

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 - přehled materiálů a zařízení

v anglickém jazyce:

Optimization of wax pattern manufacture - wax mixtures and equipment

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Základním předpokladem výroby kvalitního odlitku metodou vytavitelného modelu je zhotovení kvalitního voskového modelu (rozměry, povrch atd.). To především znamená výběr vhodného zařízení a voskové směsi s ohledem na tvar, složitost a velikost budoucí součásti.

Cíle bakalářské práce:

Optimalizace technologie voskových modelů dle konkrétních podmínek slévárny, tj. především výběr vhodných vosků a parametrů vstřikování.

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., 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. VOIGHT, RC. Factors Influencing the Dimensional Variability of Investment Castings. In Proceedings of the 45th Technical Meeting. Dallas: Investment Casting Institute, USA, 1997, p. 42-60.
5. HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárství. Říjen 2001, roč. XLIX, č. 10, s. 570–580. ISSN 0037-6825.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Kvalitní voskový model je základním předpokladem kvalitního odlitku při použití metody ztraceného vosku. Velmi důležitou součástí této technologie je i znovupoužití vosků pomocí jejich regenerace a rekonstituce.

Klíčová slova

voskový model, regenerace vosků, rekonstituce vosků

ABSTRACT

A quality wax pattern is a basic presumption of a quality final casting when using "a lost wax process". Very important is also re-using the waxes through the process of wax recycling and wax reconstitution.

Key words

wax pattern, wax recycling, wax reconstitution

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBÍK, J. Optimalizace výroby voskových modelů - přehled materiálů a zařízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 37 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Optimalizace výroby voskových modelů - přehled materiálů a zařízení vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27.5.2010

.....
Jiří Kubík

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 PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL.....	9
1.1 Úvod do technologie.....	9
1.2 Historie.....	10
2 VOSKOVÝ MODEL.....	11
2.1 Postup výroby odlitku technologií vytavitelného modelu.....	11
2.1.1 Výroba matečné formy.....	11
2.1.2 Materiály pro výrobu matečné formy.....	11
2.2 Zhotovení voskového modelu.....	13
2.2.1 Vstřikování vosku.....	13
2.2.2 Sestavování modelů.....	14
2.2.3 Obalování modelů.....	14
2.2.4 Vytavování modelové hmoty.....	15
2.2.5 Žihání skořepin.....	16
2.2.6 Odlévání.....	17
2.2.7 Dokončovací operace.....	17
3 DRUHY VOSKŮ.....	18
3.1 Složení voskových směsí.....	18
3.2 Vlastnosti voskových směsí.....	20
3.3 Rozdělení a složení voskových směsí	24
3.3.1 Typy vosků.....	24
3.3.2 Hlavní složky voskových směsí.....	25
3.3.3 Regenerace a rekonstituce vosků.....	27
4 ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU VOSKOVÝCH MODELŮ.....	30
4.1 Způsoby výroby voskového modelu.....	30
4.2 Popis vstřikolisu.....	32
Závěr.....	35
Seznam použitých zdrojů.....	36

ÚVOD

Práce je věnována optimalizaci voskových modelů se zaměřením na zařízení a materiály používané v technologii na vytavitelný model. Nejprve se zabývá a popisuje metodu přesného lití pomocí vytavitelného modelu. Postupně je rozebrán technologický proces výroby odlitku, kam patří vstřikování vosku, sestavování modelů, obalování modelů, vytavování modelové hmoty, žíhání skořepin, odlévání a dokončovací operace. Je zde také zmínka o materiálech pro matečnou formu a její výrobě.

Další kapitola se zabývá druhy vosků. Jejich složením, vlastnostmi a regenerací a rekonstitucí voskových modelů. Regenerace a rekonstituce voskových modelů je zejména v dnešní době velmi důležitým tématem, protože ve slévárnách je snaha o co nejmenší množství odpadového vosku.

V poslední části je rozebrán popis vstřikolisu. Je zde popsáno, jak pracuje a jsou zde ukázky vstřikolisů používaných ve slévárně.

1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

1.1 Úvod do technologie

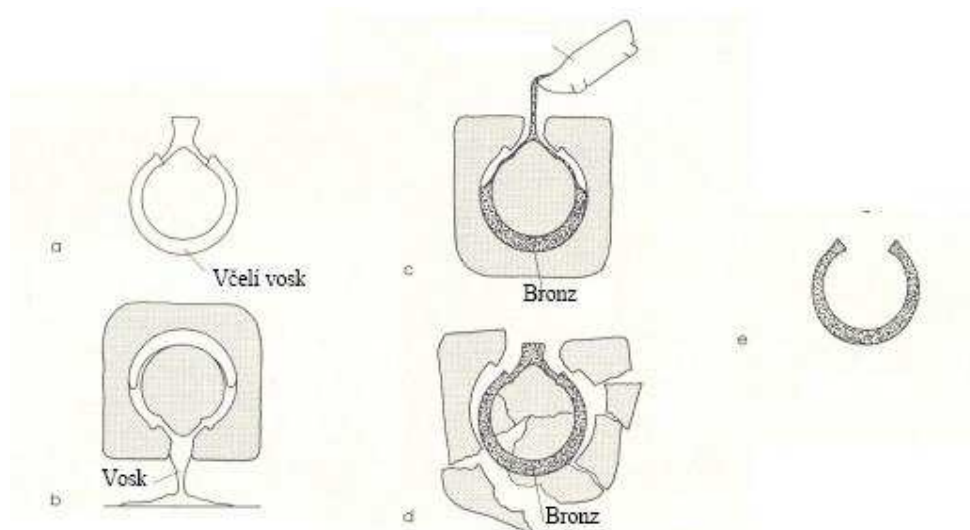
Metoda vytavitelného modelu neboli také “lost wax“ nebo “investment casting“ dnes zastává klíčovou pozici na poli moderních technologií lití kovů. Lze ji začlenit mezi technologie near-netshape (produkty blízké hotovým výrobkům), kdy se přeměna materiálu realizuje na tvary a rozměry blízké hotovým výrobkům. Termín near-net-shape nelze chápat pouze jako prostředek k zajišťování přímé, účinné a ekonomické cesty k výrobě hotové součásti ale rovněž jako úsporu drahých materiálů a energií. [1]

Tato technologie umožňuje odlévat výrobky složitých tvarů a to s dosaženou velmi vysokou přesností, bez použití následných dokončovacích operací. Dále se dají odlévat i kovy, které jsou velmi reaktivní jako je například titan a jeho slitiny. Lze ji použít pro výrobu součástí, které nemohou být vyrobeny běžnými výrobními postupy. Jedná se především o lopatky turbín, které mají velice složitý tvar nebo části letadel, které musí odolávat vysokým teplotám. [2]

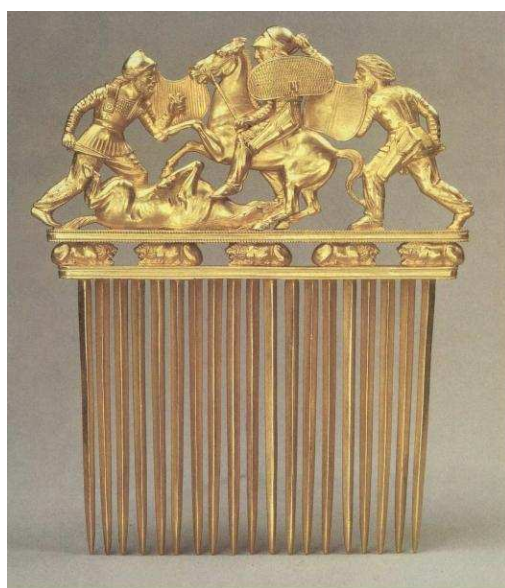
Při výrobě součástí se stále prosazují vyšší požadavky na jakost, kvalitu povrchu, rozměrovou přesnost, vnitřní čistotu, vyšší funkční parametry a to vše při silném tlaku na výrobní náklady. U některých strojírenských součástí se musí stále uplatňovat progresivní výrobní způsoby strojírenské metalurgie, které jsou schopny uведенé požadavky splňovat. Mezi progresivní způsoby lze zařadit také přesné lití vytavitelným modelem, jenž při efektivním uplatnění umožňuje podstatné úspory materiálu a snižuje použití dokončovacích výrobních operací. [3]

1.2 Historie

Lití metodou vytavitelného modelu je známo lidstvu již několik tisíciletí. Tato technologie patří mezi jeden z nejstarších slévárenských procesů. Byla využívána k odlévání šperků již před 5000-ci lety. Důkazem jsou především umělecká díla dávno zaniklých národů a kultur (Eufkrat, Egypt, Palestina, Španělsko, Persie, Čína, Mexiko a jinde). Dávnověká technologie byla přitom shodná s dnešní moderní technologií jen v principu – na originální model ze včelího vosku byla ručně nanášena vhodná hlína a tak vyrobena forma – Obr.1.1. Duté odlitky byly zhotoveny s pomocí hliněných jader. Později, v době raného novověku, bylo nalezeno dost důkazů o existenci metody vytavitelného modelu, především v renesanční Itálii. [4]



Obr. 1.1 Postup zhotovení bronzového náramku metodou vytavitelného vosku.[4]



Obr. 1.2 Odlitek hřebenu ze zlata (300g – oblast Dněpru – 4. stol. n. l.). [4]

2. VOSKOVÝ MODEL

2.1 Postup výroby odlitku technologií vytavitelného modelu

Technologii vytavitelného modelu lze rozdělit do několika výrobních fází:

2.1.1 Výroba matečné formy

Forma pro velké série (30 000 - 120 000 kusů) odlitků bývá vyrobena obráběním z hliníkové slitiny dural. Jedná se o rozebíratelný duralový blok. Jeho vnitřní dutina má konečný tvar odlitku plus přídavné tvarové prvky, které tvoří prvky vtokové soustavy. Matečná forma se může skládat až z desítek částí a tvarově složitých jader. Matečné formy pro menší série jsou vyráběny jinými technologiemi a z jiných materiálů. Tyto materiály jsou levnější, ale s menší životností z nich vyrobené formy. Oproti tomu ale výroba této formy bývá často rychlejší a operativnější. Například pro prototypové série několika desítek kusů mohou být matečné formy silikonové.

K výrobě přesného odlitku je nutné zhotovení přesného modelu s kvalitním povrchem a s přesně dodrženy rozměry, respektující všechny technologické vlivy, které se v průběhu výroby odlitku vyskytnou. Pro výrobu přesného modelu je nutné, aby byla k dispozici přesně vyrobená forma, která musí splňovat základní požadavky:

1. Výroba zdravých odlitků modelů s kvalitním povrchem tj. bez propadlin, staženin, vzduchových bublin a jiných povrchových vad s předepsanou přesností rozhodujících rozměrů.
2. Odstríknutý model by měl setrvat ve formě co nejkratší dobu.
3. Čím přesněji bude vyrobena matečná forma, tím přesnější bude odlitek.

2.1.2 Materiály pro výrobu matečné formy

Formy vyrobené obráběním - jsou používány tam kde jsou požadavky na velkosériovou produkci a dlouhou životnost, a pro výrobu odlitků požadující tu nejvyšší přesnost. Modely vyráběné v těchto formách jsou nejpřesnější, avšak jedná se o technologii nejvíce nákladnou. Výroba forem pro jednoduché modely bez vnitřních dutin je relativně nenáročná. Jejich výhodou je, že nepotřebují k zhotovení dutiny matečný model, protože forma se i s dutinou zhotoví na obráběcích strojích. Modely s vnitřními dutinami nebo tvarovým členěním, jejichž osy jsou například mimo dělicí rovinu, musí obsahovat výsuvná jádra, která vyžadují přesnou výrobu a náročné lícování ve formě. Pro výrobu forem obráběním se používá ocel a slitiny hliníku. Formy se převážně vyrábějí s přesností IT6. [3]



Obr. 2.1 Forma s výsuvnými částmi vyrobená obráběním. [3]

Formy z nízkotavitelných slitin - jejich výhodou je v poměrně rychlé a jednoduché výrobě. Lité formy se vytváří zalitím do kovového matečného modelu nízkotavitelnou slitinou. Model je uložen v ocelovém plášti. Obě dvě části formy jsou z jiných materiálů, které mají různé teploty tavení. Tavicí teplota nízkotavitelné slitiny je 150°C (51% Sn, 3 1% Pb, 18% Cd). Leštění a zaškrabávání se používají jako dokončovací operace funkčních ploch formy. Formy se vyrábí s přesností IT 8-9.

Formy ze sádry - trvanlivost forem a nároky na rozměrovou přesnost jsou minimální. Používají se k výrobě uměleckých předmětů.

Formy vyrobené galvanoplasticky - tyto formy se používají na přesné a komplikované modely, které mají nízkou hmotnost. Nejsou vhodné na výrobu modelů s hlubokými drážkami, zářezy a otvory. Jejich výroba je drahá.

Formy ze silikonové gumy - formy slouží k výrobě voskových modelů, u nichž jsou minimální nároky na rozměrovou přesnost. Výhodou je, že jsou vyrobeny z pružného materiálu a umožňují výrobu modelů s negativními úkoly.

Ostatní - formy vyráběné metalizací, dřevěné formy. [4]

2.2 Zhotovení voskového modelu

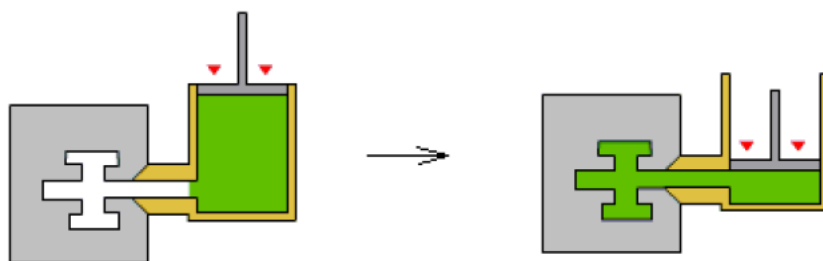
Voskové modely se zhotovují podle použitého tlaku a teploty třemi způsoby:

1. Gravitační lití – nad teplotou likvidu vosku
2. Odstříknutí za zvýšeného tlaku (0,5–1 MPa) – těsně pod teplotou likvidu
3. Odstříknutí za vysokého tlaku (2,5–8 MPa) – pod teplotou likvidu z kašovitého stavu

Gravitační lití se při kusové výrobě používá velmi výjimečně. Vstřikolisy se používají pro výrobu voskových modelů pod tlakem. Vstřikováním nízkého tlaku získáme modely s hladším povrchem, ale rozměrově méně přesné. Naopak vstřikováním vysokého tlaku mají modely horší kvalitu povrchu, ale mají přesnější rozměry. U těchto modelů se vyskytuje menší množství povrchových staženin. [5]

2.2.1 Vstřikování vosku

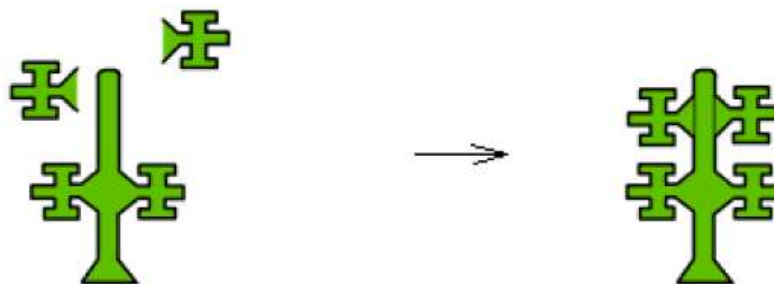
Do matečné formy se vstříkne vosk. Za nějakou dobu vosk ztuhne, forma může být rozebrána a hotový voskový model vytažen. Po vytažení modelu je forma očištěna od zbytků vosku a nečistot a vnitřní forma je ošetřena separátorem. Tím je forma připravena pro další použití. [3]



Obr. 2.2 Vstřikování vosku do formy. [3]

2.2.2 Sestavování modelů

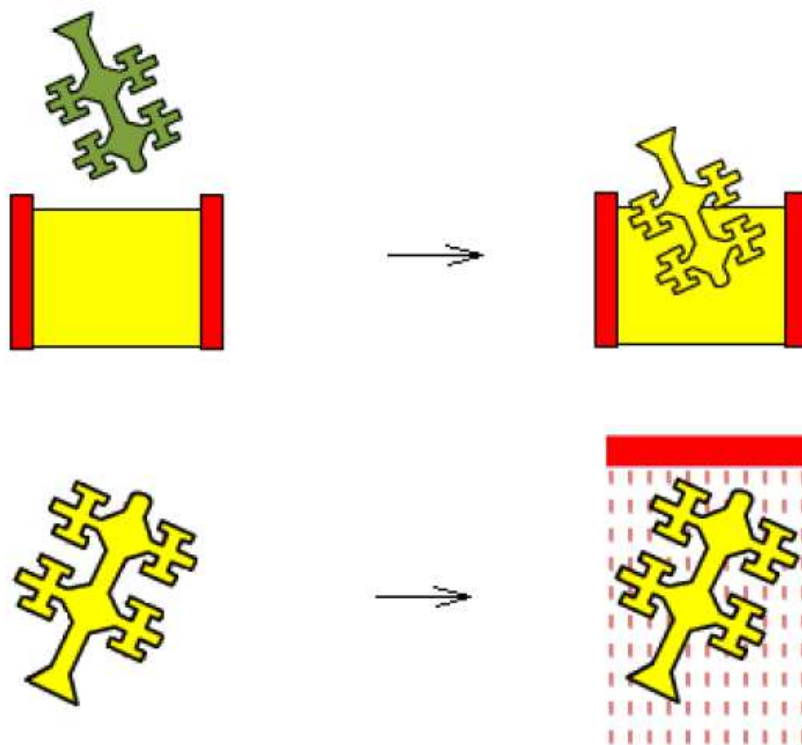
Děje se tak po „vyzrání“ (stabilizaci) voskového modelu (min 24 hod), kdy se drobnější modely sestavují do tzv. „stromečků“ pomocí pájení nebo lepení. Tvar stromečku ovlivňuje způsob připojení modelů, technika obalování, vytavování, lití a oddělování odlitků od vtokové soustavy. Vtoková soustava bývá často vyrobena z regenerovaného vosku (tj. nikoliv z vosku nového – panenského). [6]



Obr. 2.3 Sestavování modelů do stromečku. [3]

2.2.3 Obalování modelů

Odmaštěný model (stromeček) je ponořen do obalové keramické břechky. Ta se skládá z pojiva (alkosoly nebo hydrosoly) a plniva (nejčastěji křemenná moučka). Poté je stromeček zasypan jemným posypovým pískem. Tímto posypem bývá křemenný písek, molochit nebo jiné materiály podle odlévaného kovu a složitosti odlitku. Poté se stromeček suší (vytvoří se skořepina) a je na něj nanášena další vrstva keramiky. Dva obaly jsou z jemnějšího posypu pro dokonalou reprodukci povrchu a třetí a další obaly jsou zpevňovací a zajišťují pevnost a prodyšnost skořepiny. Tyto jsou tvořeny hrubším posypovým pískem. Počet obalů se volí podle náročnosti modelu a tak pro běžné menší odlitky v zasypané skořepině vystačíme se třemi obaly, velké nebo umělecké samonosné skořepiny jsou vyráběny i s desíti obaly. Každý obal skořepiny se zvlášť suší a podle typu keramiky a intenzity může sušení trvat od jednoho dne až několik dnů. [7]



Obr. 2.4 Namáčení voskových modelů do keramické břechky a posypávání voskových modelů žáruvzdorným materiálem. [3]

2.2.4 Vytavování modelové hmoty

Z hotového usušeného stromečku je vytaven vosk. Toto je prováděno na bojlerklávu. Bojlerkláv je tlaková nádoba s vyvíječem páry. Pára z kotle, bojleru je během několika sekund přepuštěna do tlakové nádoby, čímž se skokově zvýší teplota až na 150 °C a tlak vzduchu (páry) výše než 1 MPa. Teplota v bojlerklávu musí být vyšší než teplota tavení vosku pro rozpuštění vosku. Tlakový a tepelný šok nataví tenkou vrstvu vosku, přiléhající těsně ke skořepině. Tento vosk odteče ze skořepiny a zbylý vosk již má prostor pro objemovou dilataci v teple, dokud se také zcela nerozpustí a ze skořepiny nevyteče. Tepelný šok, je nutný, aby skořepina při vytavování nepopraskala vlivem teplotní dilatace vosku za vyšších teplot. Tímto postupem vznikne čistá skořepina, jejíž vnitřní tvar je tvarem odlitku a vtokové soustavy. [7]

A) Za vysoké teploty

- vložením do pece o teplotě minimálně 750 °C s následným žiháním na 900 – 1000 °C

B) Za nízké teploty

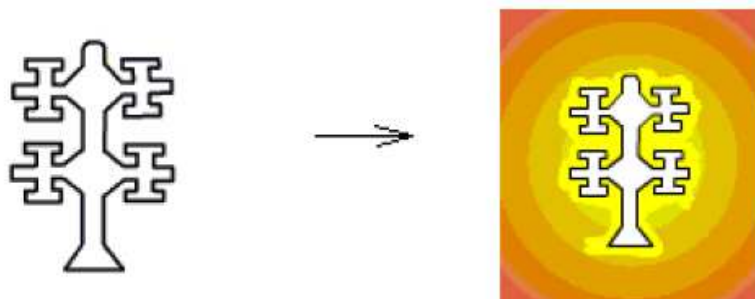
- ve vroucí vodě
- v autoklávu v přehřáté páře (0,3 – 0,6 MPa , t = 135 –165 °C)
- dielektrickým ohřevem (ohřev navlhčené skořepiny umístěné v poli vysokofrekvenčních oscilací)
- proudem teplého vzduchu (do středu voskového modelu). [6]



Obr. 2.5 Vytavení voskového modelu. [3]

2.2.5 Žihání skořepin

Žihání skořepiny slouží k převedení amorfni formy vazné vrstvičky SiO₂ na formu krystalickou, při současném odstranění všech těkavých látek. Teplota žihání bývá v rozmezí 900 – 1000 °C (pro SiO₂), pro moločit, korund aj. jsou teploty vyšší – 1200-1400 °C. [6]



Obr. 2.6 Žihání skořepin. [3]

2.2.6 Odlévání

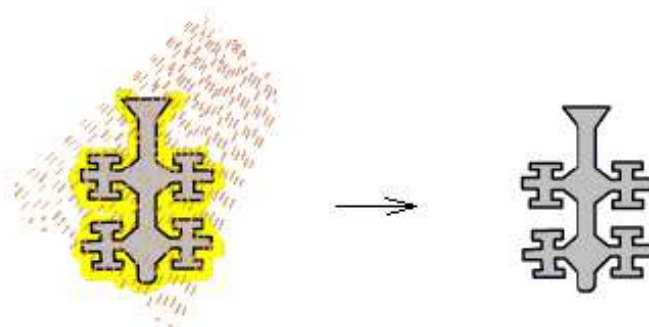
Odlévání se provádí buď na vzduchu (otevřené lití) nebo ve vakuu (vakuové lití). Keramické formy jsou při lití buď na teplotě 700-800°C (těsně po vytažení z žhací pece – tzv. lití do žhavých forem) nebo na teplotě okolí (lití do studených forem – nelze aplikovat u forem křemenných pro nebezpečí jejich popraskání při chladnutí v důsledku transformace křemene při 572°C). [6]



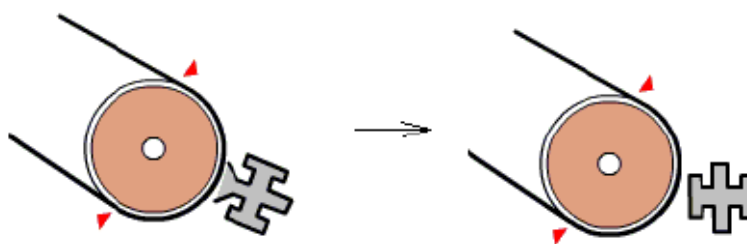
Obr. 2.7 Tavení a odlévání. [3]

2.2.7 Dokončovací operace

Mezi tyto operace patří očištění kovového stroměčku od skořepiny, obroušení vtoků z odlitku a otryskání odlitků.



Obr. 2.8 Očištění kovového stroměčku od skořepiny. [3]



Obr. 2.9 Oddělování vtoků z odlitků. [3]

3 DRUHY VOSKŮ

Vosk je nestarší termoplastický materiál, který člověk zná. Protože vosk může být lít nebo formován v tekutém, polotekutém nebo plastickém stavu, je jeho historie spojená s vývojem umění, řemesel a růstem průmyslu. Ve starověku čínští a egyptští řemeslníci používali technologii ztraceného vosku, ale pojem vosk byl spojen pouze s voskem včelím. Dnešní pojem „vosk“ je speciálně ve slévárenské technologii lítí na ztracený model spojen s materiály mající vlastnosti podobné vosku. [8]

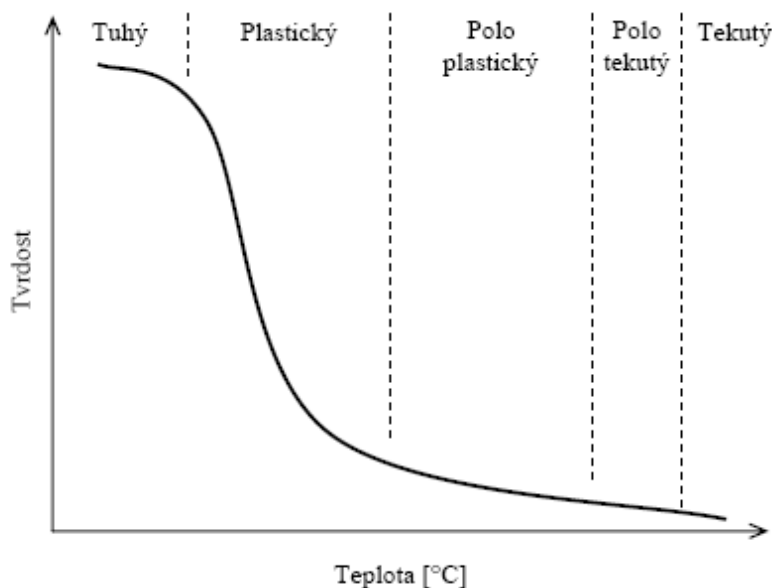


Obr. 3.1 Ukázky voskových modelů. [9]

3.1 Složení voskových směsí

Voskové směsi obsahují mnoho prvků jako například přírodní uhlovodíkové vosky, syntetické vosky, přírodní pryskyřice, syntetické pryskyřice, organické přídavné materiály, vodu a další. Různé variace těchto component byly vyvinuty k tomu, aby vyhovovaly různým požadavkům výroby. [8]

Všechny požadavky ovlivňují složení a strukturu voskové směsi. Pro vnitřní strukturu je typické řetězení uhlíkových atomů. Délka a tvar řetězení atomů ovlivňuje tvrdost, viskozitu, ale i teplotu tavení. Čím kratší je řetězení, tím má vosk nižší bod tání a hodnotu tvrdosti. Se zvětšující se délkou se zvyšuje tvrdost, bod tání nebo tuhnutí. Podmínka, že ztracený vosk je směs velkého počtu složek, které mají různé délky řetězců má za následek, že vosk prokazuje odlišné fyzikální chování od jiných látek. Vosk nelze roztavit rychlým ohřevem jako další chemické stejnorodé sloučeniny, ale prochází různými přechodovými stavy. [5]



Obr. 3.2 Závislost tvrdosti vosku na teplotě. [6]

Z tvaru křivky můžeme zjistit, že vosk, který má na začátku pevnou konzistenci se stává měkký, dále plastický a s následným ohřevem, těstovitý. Ve vyšší teplotě získává vosk konzistenci hutné kapaliny (polotekuté). V konečné fázi probíhá kompletní tavení na Newtonovu kapalinu. Postupná změna v celkovém stavu nastává od krátkých zlomkových řetězců roztavených jako první, ale delší řetězce zůstávají pevné. S následným zvýšením teploty, pozdější roztavený kov dosáhne kapalného stavu. Aktuální tvar křivky a teplotní rozmezí každé fáze je přirozený odraz specificky provedené směsi. Opačný proces bude probíhat při ochlazování a bude se opakovaně vyskytovat podle provedení směsi přes delší a kratší rozsah teplot. [5]

3.2 Vlastnosti voskových směsí

Pro studium vlastností voskových směsí je vhodné mít představu o vlastnostech směsi ideální, se kterou lze vlastnosti konkrétní modelové hmoty srovnávat. Ze zkušeností v praxi by měla ideální směs vykazovat zejména následující vlastnosti:

- Směs by měla mít minimální smrštění při chladnutí a minimální roztažnost při ohřevu.
- Během tuhnutí ve formě by měla získat dostatečnou pevnost a tvrdost z hlediska dalšího technologického zpracování - přitom by neměla být příliš křehká.
- Směs by měla co nejpřesněji reprodukovat stěny formy a neměla by se na ně lepit. Povrch by měl být čistý a hladký.
- Vosková směs by neměla chemicky reagovat s materiálem keramické břečky. Modelová hmota by měla odolávat oxidaci.
- Hotový model by měl mít vysokou smáčivost ve styku s keramickou břečkou.
- Směs by měla obsahovat minimum popela, protože ten, pokud ve skořepině zůstane, způsobuje vady odlitku – vměstky.
- Doba tuhnutí směsi v matečné formě by měla být minimální.
- Struktura směsi by měla být izomorfní.
- Směsi by měly být maximálně recyklovatelné a ve všech stavech zdravotně nezávadné.

Je pochopitelné, že je velmi obtížné najít takovou směs, která by v dostatečné míře splňovala všechny požadavky. Je proto výhodné mít přehled o faktorech, které ovlivňují kvalitu konkrétního modelu nejvíce, a na základě této znalosti potom volit pro každý model konkrétní směs. [6]

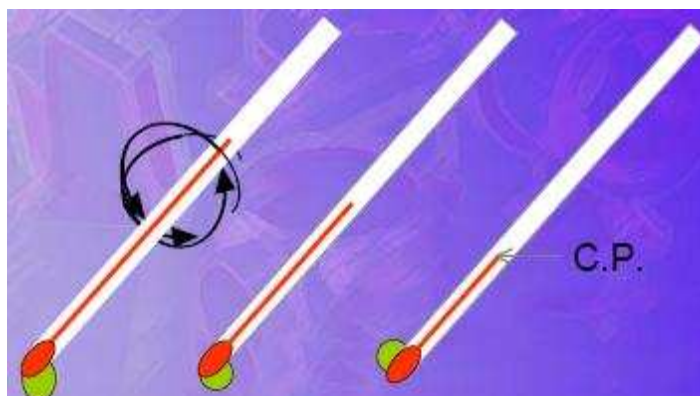
Jak je vysvětleno v předchozí kapitole, většina vosků pro metodu ztraceného vosku jsou komplexní směsi různých složek. Každá složka je zahrnutá k tomu, aby do určité míry ovlivňovala konečné vlastnosti voskových směsí. Tyto vlastnosti vosku mají prvořadý význam pro slévárnu, aby produkovala dobré odlitky. Jak jde kupředu vývoj průmyslu, bude kladen ještě větší důraz na kontrolu těchto vlastností.

Tyto vlastnosti obsahují :

- smršťení
- bod tuhnutí a tavení
- obsah popelovin
- viskozitu
- tvrdost a pružnost
- dobrou jakost povrchu
- rychlost tuhnutí
- stálost při oxidaci
- regenerovatelnost atd.

Bod tuhnutí

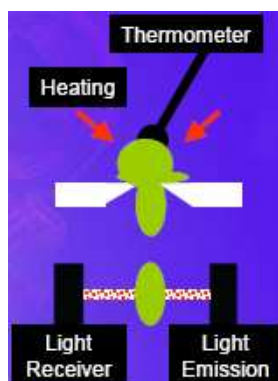
Bod tuhnutí je teplota, při které malá kulička vosku přestane téci vlivem gravitace. Teplota (°C) při které se toto stane, se nazývá C.P.



Obr. 3.3 Určení bodu tuhnutí. [10]

Bod tavení (skápnutí)

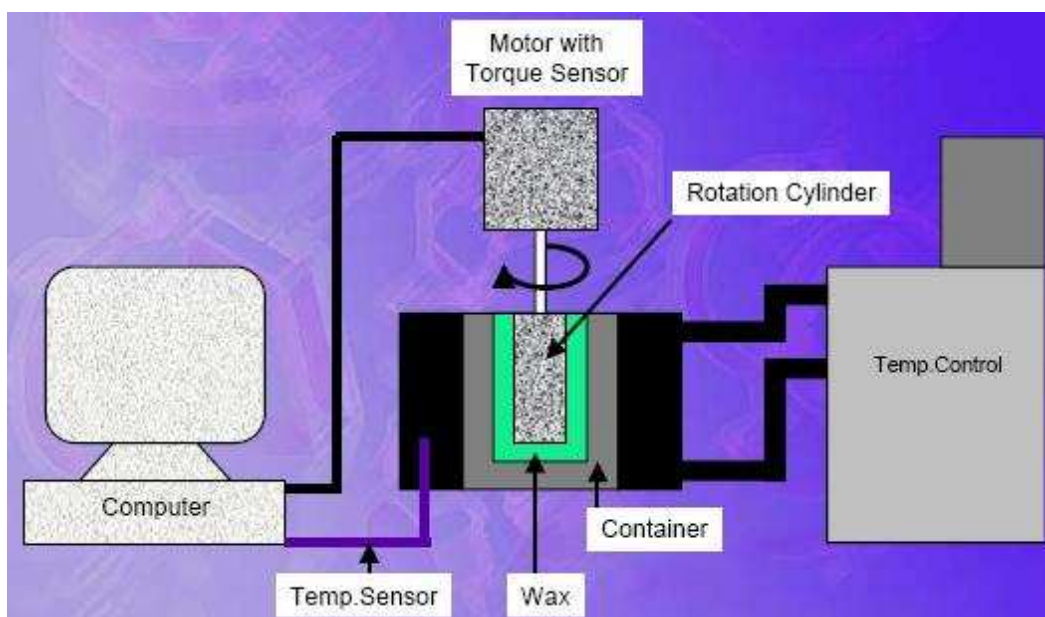
Bod tavení (skápnutí) je určen jemným ohřevem známého ztuhlého objemu vosku, dokud „nevypadne“ ze dna speciálního kelímku. Světelný paprsek detekuje roztavený vosk a teplota je zaznamenána zapisovačem dat.



Obr. 3.4 Určování bodu tavení (skápnutí). [10]

Viskozita

Vosk je nalit do nádoby při teplotě 80°C a nechá se stabilizovat. Teplota je poté snížena pomocí motoru aplikujícího známý poměr rychlosti. Snímač kroutícího momentu zpracuje, kolik síly je potřeba na zachování stejné rychlosti motoru. Jak vosk chladne, síla potřebná k udržení konstantní rychlosti motoru roste a počítač zpracovává sbírané informace a zobrazuje je jako graf.



Obr. 3.5 Stroj na měření viskozity. [10]

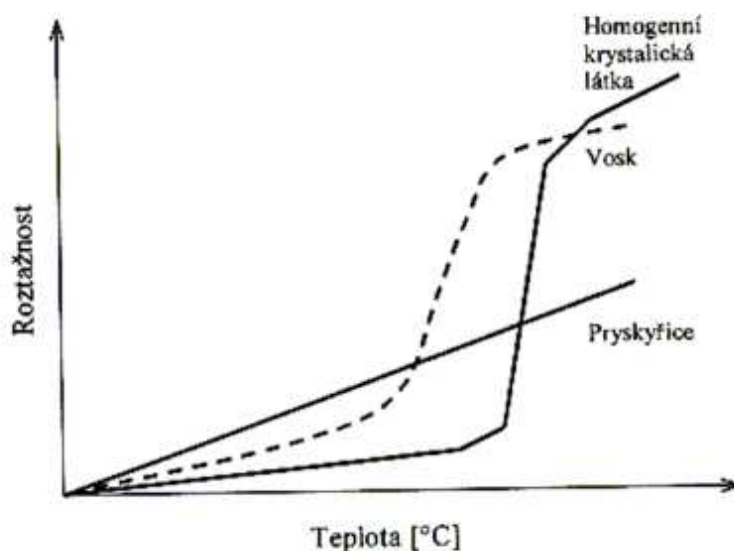
Obsah popelovin

Obsah popelovin je popsán jako procento nehořlavých sloučenin zbývajících po kompletním spálení na vzduchu. Vosky firmy Blayson mají maximální hodnotu popelovin 0,05%. Vosk s vysokým obsahem popelovin způsobí viditelné defekty na dokončených částech.

Penetrace

Penetrace nás společně s drsností vede ke znehynění vosku. Penetrace se uskutečňuje při 25°C (vodní lázeň je použita na přípravu vzorku po dobu dvou hodin). Jakmile byl vzorek připraven, 200g je aplikováno do vertikální jehly (známého rozměru) po dobu 5 s. Výsledek je dosažen v jednotkách 10th mm. [10]

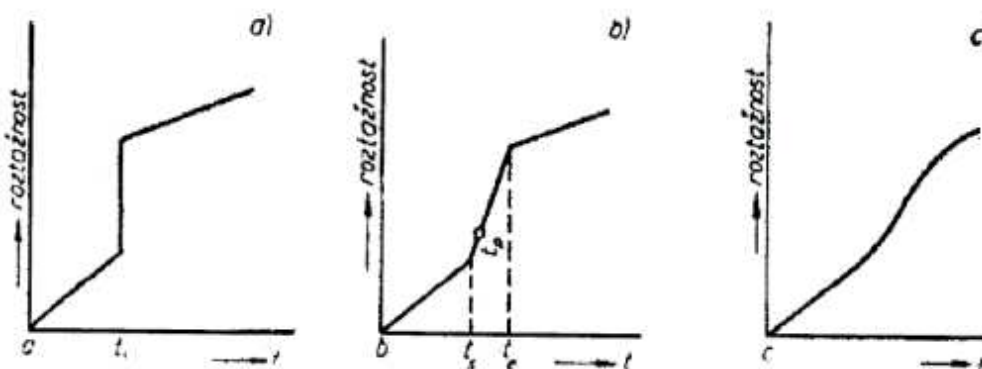
Roztažnost vosku mezi teplotou 20°C a bodem tavení není rovnoměrná, ale mění se v rozsahu teplot v závislosti na změně struktury vosku. Křivky roztažnosti materiálu jsou znázorněny na obr. 17.



Obr. 3.6 Porovnání roztažnosti homogenní krystalické látky, voskové směsi a pryskyřice. [6]

Z obrázku je patrné, že organická látka podstupuje v průběhu ohřevu relativně malou expanzi. V bodě tavení dochází k rozpadnutí krystalické struktury a přejde do kapalného stavu. Jev je charakterizovaný rychlým zvětšením objemu. V kapalném stavu je expanze znovu malá. K přechodu z pevného skupenství do kapalného u voskových směsí dochází ve velkém rozmezí teplot.

Mezi nejzákladnější znalosti chování směsí patří tepelná roztažnost, která nám ukazuje obraz o lineárním smrštění dané směsi. [5]



Obr. 3.7 Závislost roztažnosti na teplotě. [9]

Křivka tepelné roztažnosti čisté látky znázorněná na obr. 3.7 ukazuje, že roztažnost se vzrůstající teplotou roste lineárně, až do okamžiku, kdy dochází k roztavení materiálu. Změna objemu se projeví při změně skupenství prudkým nárůstem roztažnosti. V kapalně oblasti je průběh roztažnosti lineární. Na obrázku b) je znázorněna křivka roztažnosti směsi látek, která se liší jen tím že změna skupenství se neuskuteční při jedné teplotě, ale v rozsahu teplot. Teplotní rozsah bude tím větší, čím bude směs látky různorodější. Křivka má lineární průběh až do bodu tání. Změna skupenství probíhá postupně a je provázána změnou objemu. V kapalně oblasti je průběh roztažnosti lineární. Z obrázku c) je vidět průběh roztažnosti modelových vosků. Modelové vosky jsou tak různorodé, že nemají teploty t_s a t_c na křivce roztažnosti příliš výrazné. Z křivek tepelné roztažnosti je patrné, že smrštění modelu bude tím vyšší, čím vyšší bude teplota při vstřikování, proto je potřeba vyrábět voskové modely při teplotě co nejnižší, aby byly modely co nejpřesnější. [4]

3.3 Rozdělení a složení voskových směsí

3.3.1 Typy vosků

Podle typu se voskové směsi dělí na:

- přímé (neplněné)
- plněné
- emulzifikované

Přímý (neplněný) vosk – je v provedení komplexní směsi, která je složená z voskových a pryskyřičných částí. Povrchová úprava má být lesklá. Tyto směsi se regenerují a jsou rekonstituovány na další využití vtokových systémů.

Emulzifikovaný vosk – má obdobné základní suroviny jako přímý vosk, ale je emulzifikován s vodou normálně mezi 7-12 %. Emulzifikovaný vosk má povrchovou úpravu hladkou. Malá kavitace vzniká v důsledku působení vody jako částečného plniva. Za předpokladu, že slévárna dodržuje podmínky dané dodavatelem je manipulace s emulzifikovaným voskem velmi snadná. Je značně využívaná pro jeho všestrannost. Směsi se regenerují a rekonstruuji pro použití na vtokové systémy.

Plněný vosk – má stejné základní suroviny jako předešlé typy vosku. Do plněného vosku se přidává práškový, netečný přídavný materiál, který dává směsi větší stabilitu a menší kavitaci. Použité plnivo je základ pro zajištění kompletního shoření bez zanechání popele. Využívá se určitého počtu přídavných materiálů. Aby povrchová úprava nebyla zhoršena, je nutné použít vhodnou velikost částic plniva. Je důležité zabezpečit váhu plniva, aby byla co nejvíce podobná váze základního vosku, pro zajištění minimálního odloučení, když je vosk v kapalném stavu. I tento vosk je široce užívaný a obvykle může být regenerován a rekonstituován pro použití na vtokové soustavy.

Vosk používaný na vtoky – má velmi podobné základní suroviny jako přímý vosk. Je míchán tak, aby byl splněn požadavek na pevnost vtokového kúlu.

Vosk rozpustný ve vodě – je určen k tomu, aby produkoval vnitřní tvary, které by bylo obtížné vytvořit jinými způsoby. Vosk se rozpouští ve vodě nebo roztoku, který má mírně kyselý charakter.

Speciální vosky – mají charakter neplněných voskových směsí. Používají se pro namáčení, spravování a opravu a jsou vhodné k lepícím aplikacím. [11]

3.3.2 Hlavní složky voskových směsí

Podle původu se voskové směsi dělí na přírodní a syntetické.

PŘÍRODNÍ SMĚSI

Přírodní voskové směsi lze dále rozdělit na dvě skupiny - měkké a tvrdé hmoty.

MĚKKÉ HMOTY - používají se převážně při výrobě modelů gravitačním litím, hlavními složkami jsou nejčastěji parafín a cerezín.

Cerezín

Je to směs tvrdých metanových uhlovodíků, čistý je v podobě malých krystalků jehličkovitého tvaru. V porovnání s parafínem má vyšší teplotu měknutí a je odolnější vůči deformacím. Obsah popela do 0.03%. Nevýhodou je vedle poměrně nízké pevnosti, tvrdosti a plasticity značné lineární smrštění – až 3.5%.

Parafín

Směs tvrdých nasycených uhlovodíků, měkne již při teplotě 30°C. Teplota tavení závisí na stupni jejich rafinace a pohybuje se v rozmezí 42-64°C. Obsah popela do 0,1%. Nevýhodou je křehkost a nízká pevnost.

TVRDÉ HMOTY - používají se pro výrobu voskových modelů na vstřikolisech, hlavními složkami jsou montánní vosk, romonta a kalafuna.

Montánní vosk

Směs voskových a pryskyřičných látek s podílem asfaltických látek. Jejich vzájemný poměr určuje kvalitu surového vosku. Používá se jako hlavní složka „tvrdých“ modelových směsí a dává jim charakteristické vlastnosti, tj. tvrdost, úzký interval tuhnutí a dostatečnou stabilitu za normální i zvýšené teploty. Se zvyšujícím se obsahem asfaltických látek se kvalita montánního vosku snižuje, protože tyto látky mají vyšší teploty tavení než vlastní modelová hmota (až 120 °C).

Romonta

Směs monokarbidové kyseliny, hydrokyseliny a jejich esterů, montánní pryskyřice a asfaltických částí. Vosk romonta se používá v kombinaci s cerezínem, čímž vzniká velmi rychle tuhnoucí binární sloučenina. Rychlé tuhnutí způsobuje, že gravitačně lité modely praskají. Aby se prodloužil interval tuhnutí, přidává se do této směsi další složka – kalafuna.

Kalafuna

Tvrdá složka smoly jehličnatých stromů. Pro směsi se nejčastěji používá borová kalafuna s obsahem popela do 0,04 % a teplotou měknutí minimální 66 °C.

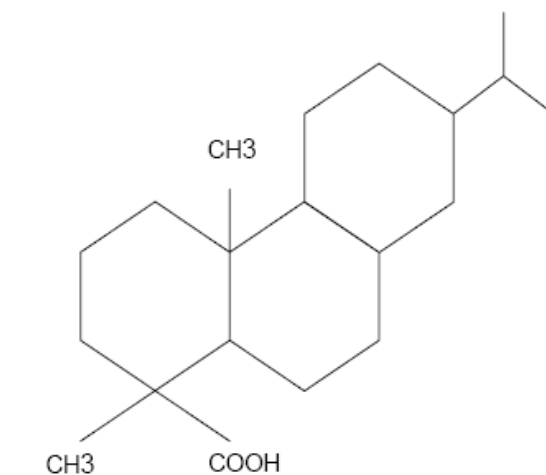
SYNTETICKÉ SMĚSI

Syntetické vosky se skládají z těchto složek:

- pryskyřice
- vosky a polymery
- plnivo

Pryskyřice

Je amorfní v ideálním případě inertní látka. Ve směsi plní úlohu ztekucovadla. Lze je podle původu dělit na přírodní, částečně syntetické a plně syntetické. Většina pryskyřic není úplně inertní a oxiduje, a proto je nutné použití stabilizátoru.



Obr. 3.8 Struktura pryskyřice. [9]

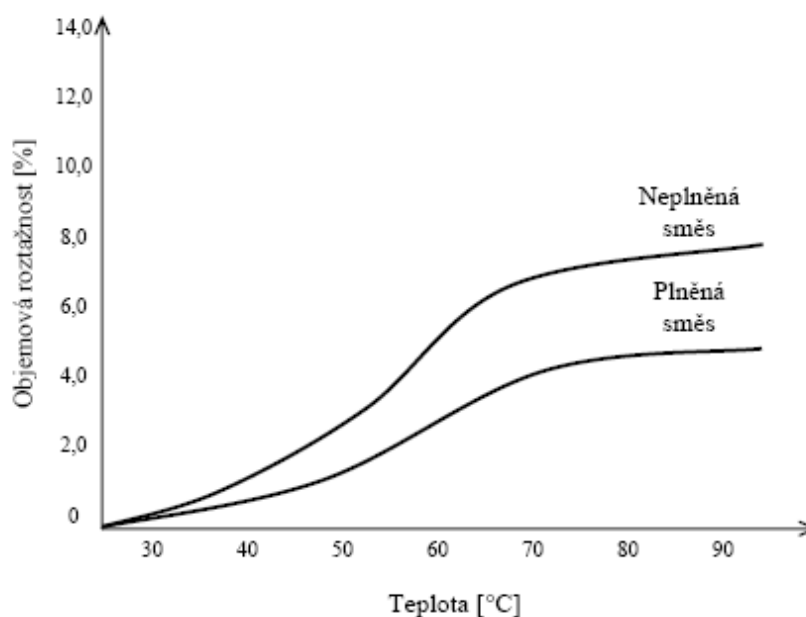
Vosky a polymery

Vosk je inertní krystalická látka. Kvalitní vosk nelze vyrobit pouze z ropného vosku, a proto je míchán ze směsi více vosků s polymery. Polymery zvyšují viskozitu a do značné míry ovlivňují fyzikální vlastnosti – dělí se podle původu na petrolejové, syntetické a přírodní.

Plnivo

Ve srovnání s neplněnými se plněné směsi vyznačují zejména významně nižším smrštěním, což znamená vznik menší staženiny. Také při opačném

procesu, tj. při zvětšování rozměrů se vzrůstající teplotou, vykazují plněné směsi ve srovnání s neplněnými podstatně nižší změny objemu, což je důležité pro vytavování vosků ze skořepiny, kdy hrozí jejich popraskání. Výběrem plniva lze také velmi podstatně ovlivnit tepelné, mechanické a chemické vlastnosti voskové směsi. [6]



Obr. 3.9 Vliv plniva na objemové změny vosku. [6]

3.3.3 Regenerace a rekonstituce vosků

Regenerace vosků

Hospodářské a ekologické trendy vedly k tomu, že obnova vosků patří k podstatné části obchodní činnosti dodavatelů. Dříve se představovala obnova vosků pouze jako ekonomicky výhodná alternativa pro výrobu vtoků a nálitků. Vlivem konkurence a nutnosti ušetřit na spotřebním materiálu se zvýšila poptávka po cenově výhodných produktech a dnes již mají regenerované vosky stejné vlastnosti jako panenské vosky.

Nejčastější způsoby regenerace:

Sedimentace (nejstarší metoda)

- vosk roztaven, homogenizován a ponechán v tekutém stavu
- voda, keramické nečistoty a plnivo větší hustota → usadí se na dně
- po určité době vosk odlít a znovu použít

Nevýhody:

- časová náročnost
- přesnost při nastavení teploty

Filtrace

- využívá filtračního lisu, vosk z autoklávu přečerpán přes lis
- vosk teče přes filtrační textilii
- plnivo, keramické nečistoty a spaliny se usadí na textilii → filtrační kůra
- po zaplnění lisu tok vosku přerušen, lis otevřen a vyčištěn
- filtrační kůra podle předpisů zlikvidována

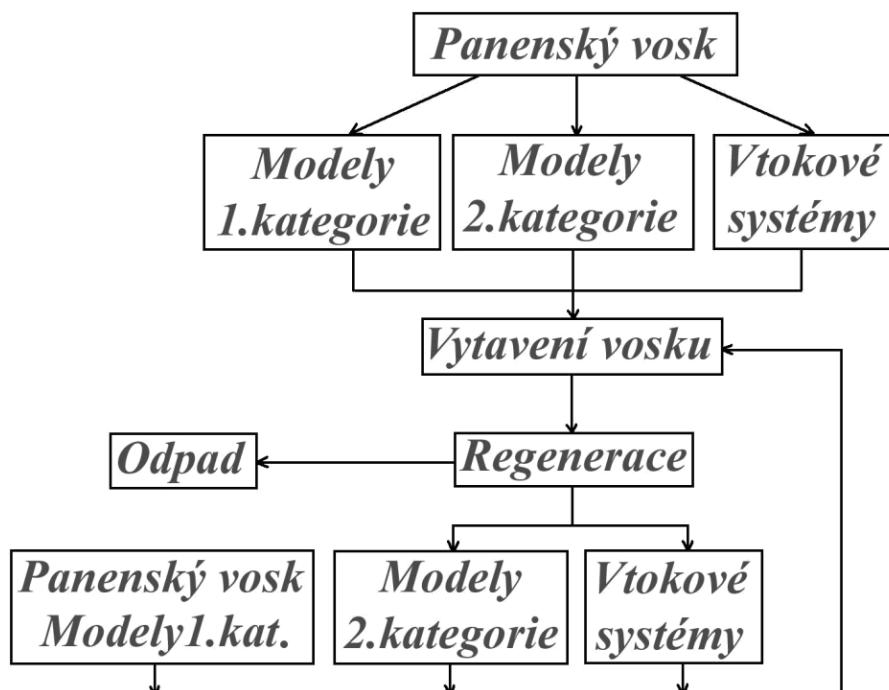
Odstředivý způsob

Obsah plniva ve vosku je vyšší.

- vosk z autoklávu přečerpán do vysokorychlostní centrifugy
- částice s vyšší hustotou než vosk se oddělí
- částice s podobnou hustotou zůstávají ve vosku

Nevýhoda:

- odstředěný vosk obsahuje vyšší podíl popela než vosk filtrovaný[5].



Obr. 3.10 Schéma regenerace. [9]

Rekonstituce

Je proces, při kterém buď vosk vytavený slévárnou v autoklávu nebo slévárnou použitý vosk známého druhu může být vyčištěn a smíchán s novými surovinami, nebo-li rekonstituován na dohodnutou specifikaci a vrácen pro použití k výrobě modelů. Rekonstituce se používá pro výrobu modelů 1. kategorie.

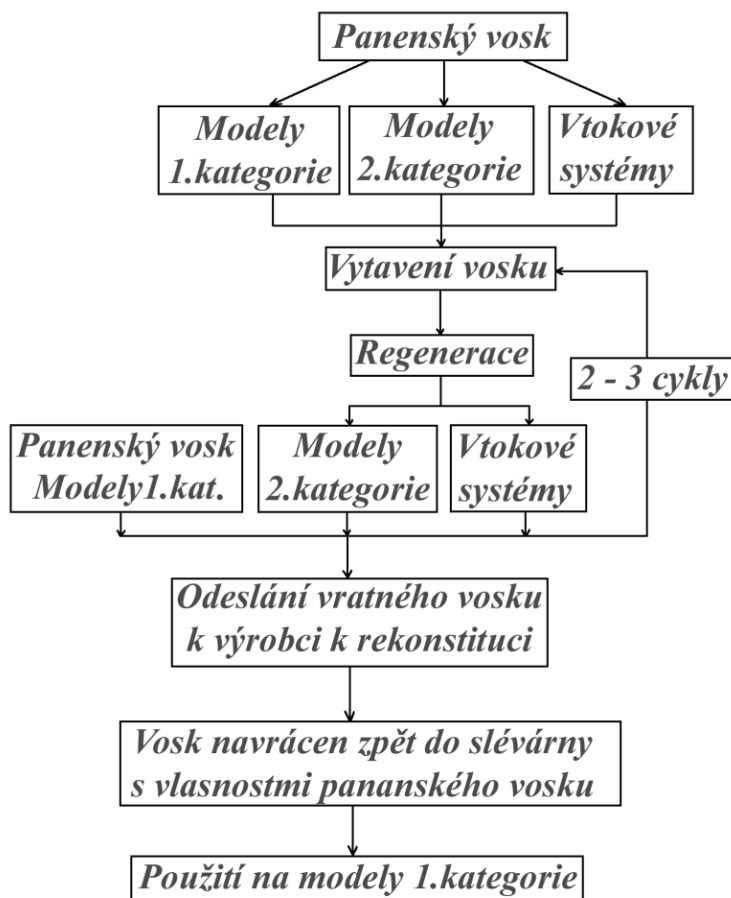
Rekonstituovány mohou být všechny druhy vosků:

- neplněný
- emulzifikovaný
- plněný

Rozdíly mezi rekonstituovaným a panenským voskem:

V kvalitě a specifikaci není žádný rozdíl. V ceně je ten rozdíl, že rekonstituovaný vosk má hodnotu 65 – 70% panenského vosku.

Systém regenerace – rekonstituce nabízí značné úspory nákladů a výhody z hlediska ekologického. [9]



Obr. 3.11 Schéma rekonstituce. [9]

4 ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU VOSKOVÉHO MODELU

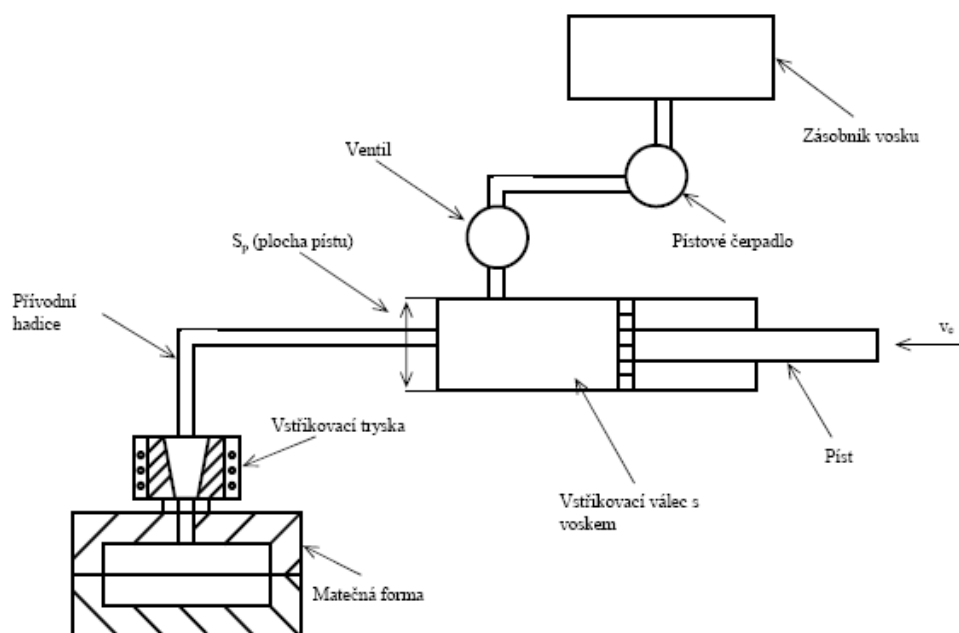
4.1 Způsoby výroby voskového modelu

Voskové modely se vyrábějí dvěma způsoby:

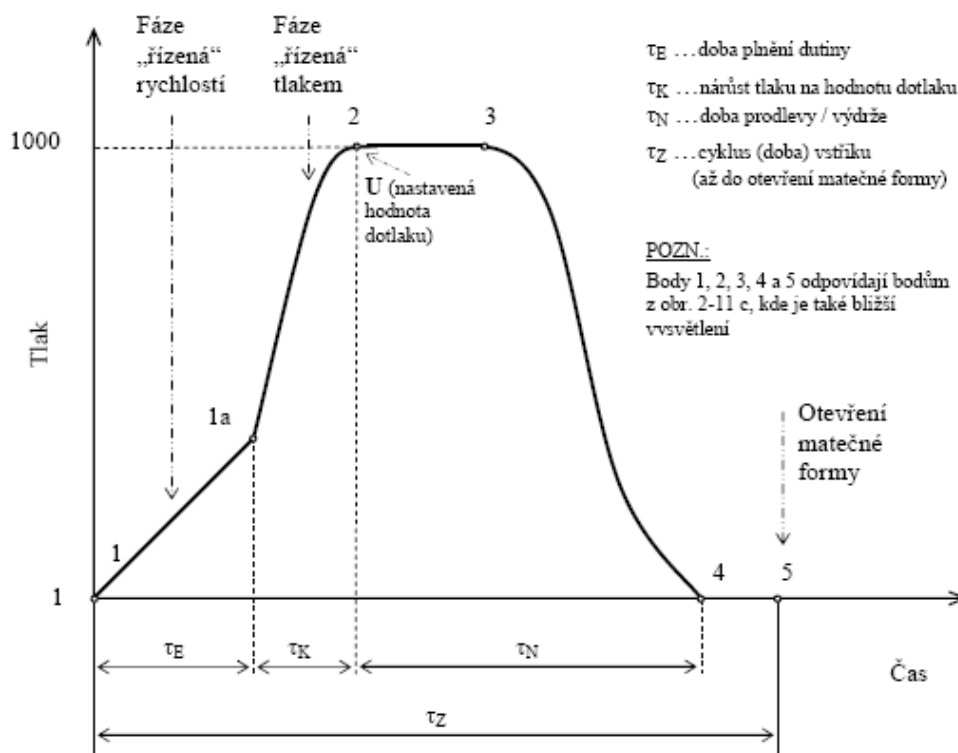
- vstřikováním do formy
- gravitačním litím do formy

Vzhledem k tomu, že převážná část voskových modelů se dnes vyrábí na vstřikolisech (Obr. 4.1), pod pojmem způsob výroby rozumíme jednak způsob přivedení vosku do dutiny matečné formy a především parametry vstřikování z nichž dominantní úlohu mají:

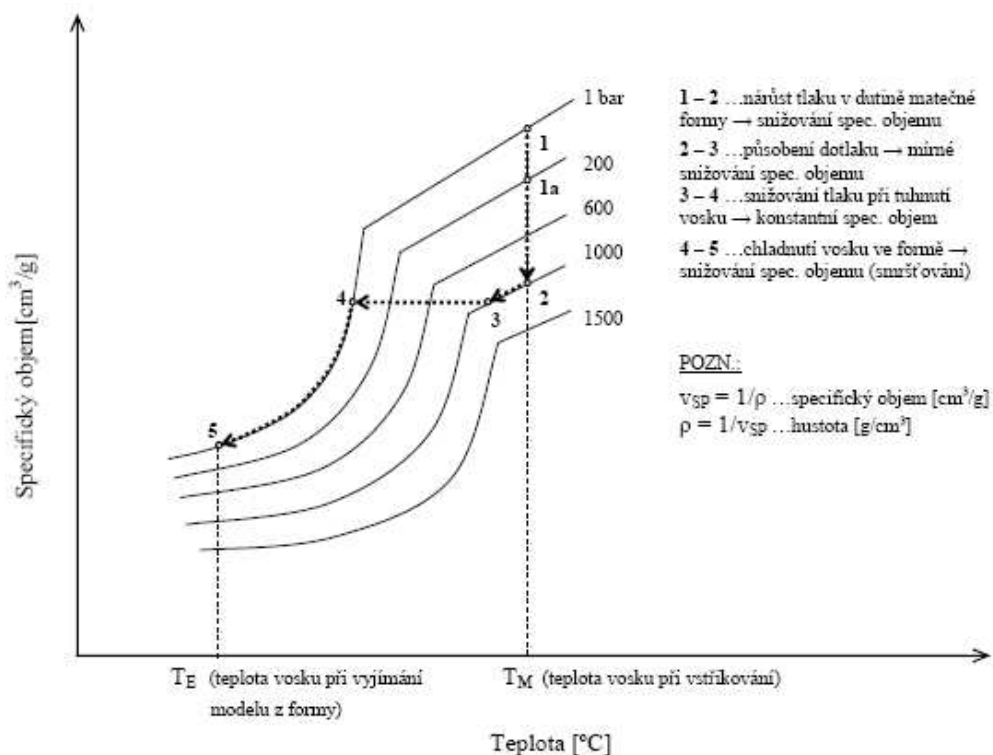
- teplota vstřikovaného vosku
- teplota matečné formy (počáteční + způsob chlazení v průběhu tuhnutí vosku)
- vstřikovací tlak vosku
- rychlost vstřikování (rychlost zaplnění dutiny formy)
- velikost a doba působení dotlaku
- doba prodlevy (po ukončení dotlaku do otevření matečné formy).[6]



Obr. 4.1 Základní schéma vstřikolisu. [6]



Obr. 4.2 Typický profil průběhu tlaku v dutině matečné formy při vstřikovacím cyklu. [6]



Obr. 4.3 Vstřikovací cyklus v souřadnicích specifický objem – teplota. [6]

4.2 Popis vstřikolisu

Vstřikolisy jsou staré již několik desetiletí a jejich koncepce se již zásadně nemění, pouze se vylepšují detaily v technických řešeních konstrukce, ovládání a údržby lisu. Základem lisu je pevná, tuhá a hmotná konstrukce schopná vstřebat otřesy a vibrace způsobené provozem stroje. Existují dvě koncepce lisu, které se používají ve většině případů, protože jsou schopny obsloužit od nejmenších až po velmi velké formy. Lis s C rámem na obrázku 4.4 a lis se čtyřmi sloupy na obrázku 4.5.



Obr. 4.4 Vstřikolis MPI s C rámem řady 55 [12].



Obr. 4.5 Vstřikolis MPI čtyřsloupový řady 35 [13].

Rozhodujícími parametry pro výrobu kvalitních voskových modelů, bez ohledu na typ stroje jsou:

- Teplota vosku ve vstřikovacím stroji – měla by být konstantní v celém stroji, tzn. teplota vosku v zásobníku by měla být stejná jako teplota vosku v trysce.
- Teplota formy.
- Vstřikovací tlak – měl by být dostatečně vysoký k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu.
- Průtoková rychlost – je nejdůležitějším parametrem při vstřikování slabostěnných modelů nebo modelů s nepravidelnými tvary. Průtoková rychlost by měla být tak vysoká, aby vosk dostatečně rychle vyplnil formu, ale zároveň by měla být dostatečně pomalá k zabránění v turbulenci a vzniku vzduchových bublin.
- Doba vstřikování a doba výdrže - měla by být dostatečná k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu. [6]

VSTŘIKOLIS

Umožňuje vstřikovat tvrdý vosk pod různými tlaky, za přesně kontrolované teploty a rychlosti tečení. To umožňuje plnit velké, či tenkostěnné formy v bezchybné kvalitě. Bez vzduchových bublin, studených spojů a nedotečených tvarů.

Dnešní vstřikolisy jsou složitá zařízení s rozsáhlými možnostmi regulace procesu plnění formy. Nejmodernější stroje jsou kompletně počítačově řízeny. Veškeré parametry se řídí přes dotykovou obrazovku a každá forma může mít svůj speciální program plnění. Počítač je schopný regulovat teplotu vosku v trysce, tlak vosku v trysce (formě), průtok vosku do formy (průběh plnění). Toto umožňuje kontrolovat plnění formy pomocí řízení průtoku, což poskytuje kvalitnější voskové modely než standardní kontrola plnění pomocí průběhů tlaků. Při příliš rychlém plnění může docházet k uzavírání vzduchu ve voskovém modelu a tvorbě vzduchových defektů. Při příliš pomalém plnění může být vosk již chladnější a může dojít ke studenému spoji - zavalenině. Při nákupu lisu není hlavním parametrem pouze maximální vstřikovací tlak a maximální velikost formy, ale řeší se i manuální či počítačové řízení a objem jednoho vstřiku. Ten je dán velikostí vstřikovacího válce, který tlačí vosk do trysky. Maximální objem jednoho vstřiku musí tedy korespondovat s objemem vstřikovacího válce. K jednomu typu vstřikolisu se dají při výrobě nainstalovat různě objemné válce. Běžně dostupné jsou válce 2 - 40 litrů.

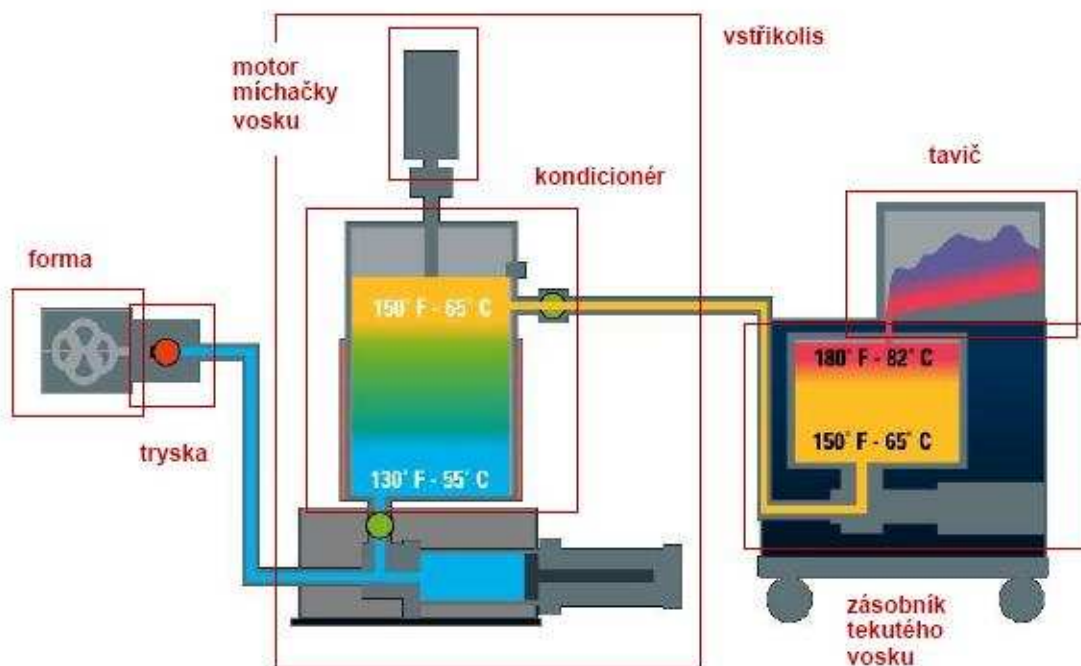
ZÁSOBNÍK VOSKU

Dalším zařízením, které je nutné pro provoz lisu je zásobník vosku. U moderních strojů to není běžný zásobník vosku vyhříváný na jednu konkrétní teplotu, ale speciální tank vyhříváný v několika patrech na různé teploty. Takto sofistikovaně řízený zásobník vosku se nazývá kondicionér na obrázku 30 v detailu. Protože na kvalitní voskový model má největší vliv vstřikovací teploty. Kondicionér umožňuje regulovat teplotu vosku vstupujícího do trysky lisu ve

velkém rozsahu teplot. Funguje fakticky jako chladič oproti teplotě tavení vosku a na výstupu z něj je požadovaný vosk v kašovitém stavu o teplotě co nejbližší k teplotě tuhnutí vosku.

KONDICIONÉR

Kondicionéru dodává roztavený vosk nejčastěji tavič zobrazený na obrázku 4.6 v detailu. Hlavním prvkem kondicionéru je rošt s regulací teploty, na který se položí desky, hroudy nebo pelety vosku. Nejlépe se taví voskové pelety, čocky. Pro zjednodušení manipulace s nimi může být použito podtlakové nasávání pelet do taviče. Nastavením regulace na teplotu tavení vosku začne roztavený vosk plnit kondicionér. Oproti obrázku 4.6, na kterém je tavič napojen na zásobník vosku a až následně se čerpá vosk do kondicionéru, může být tavič napojen na kondicionér napřímo. To jaké zvolíme řešení, ovlivňuje hromadnost výroby, voskové hospodářství, popřípadě specifické uspořádání vstříkolisu a provozu na nich. [7]



Obr. 4.6 Schéma vstříkolisu s nádrží na vosk a tavičem. [14]

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo shromáždit informace o technologii přesného lití metodou na vytavitelný model a zejména vytvořit přehled materiálů a zařízení používaných při výrobě voskových modelů.

V první části je popsán proces od začátku výroby voskového modelu až po odlévání. Technologie je popsána okrajově. Stěžejní část je zaměřena na druhy vosků, které se při této technologii dají použít. Jsou zde popsány vlastnosti a složení, které musí vosky splňovat, aby bylo možné je použít ve slévárně pro výrobu modelu. Je zde také uvedeno základní rozdělení voskových směsí. U jednotlivých rozdělení je popsáno kdy a na co se používají. V práci jsou uvedeny způsoby výroby voskového modelu. Výroba voskového modelu se provádí hlavně na vstřikolisech. V poslední kapitole je popsána činnost vstřikolisu a jsou zde uvedeny ukázky vstřikolisů.

Technologie vytavitelného modelu, nebo také loast – foam je v současnosti velmi perspektivní metodou na výrobu přesných a tvarově složitých součástí. Zejména se používá pro součásti, u kterých je potřeba dosáhnout velké přesnosti a které po odlití už nejsou potřeba dále obrábět. Na přesnosti lití tedy velmi závisí. Touto technologií jsou vyráběny také výrobky, které jinou technologií nejdou vyrobit. Odlitky vyráběné touto technologií jsou dodávány do leteckého, automobilového, energetického, zbrojařského a zdravotnického průmyslu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BEELEY, P.R.; Smart, R.F.: Investment casting, The Institute of Materials, 2002.
- [2] eFUNDA. *Investment casting* [online]. 2009. [cit. 2010-04-02]. Dostupné z: <http://www.efunda.com/processes/metal_processing/invest_casting.cfm>.
- [3] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model*. [s.l.], [cit. 2010-04-16]. 30 s. Oborová práce. Dostupný z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
- [4] DOŠKÁŘ, J. a kol.: Výroba přesných odlitků SNTL Praha 1976.
- [5] KUČERA, Tomáš., *Rozměrová přesnost odlitků ze slitin Al vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. s.83. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [6] HORÁČEK, Milan. Současné trendy v technologii vytavitelného modelu. *VUT Brno : Odbor slévárenství ÚST* [online]. 2006 [cit. 2010-04-26], 46s.
- [7] ŠMÍD, Dušan. *Optimalizace technologie vybraných náročných odlitků ze slitin Al*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s.79. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [8] Blayson Olefines Ltd. *Waxes for Investment Casting - A View from England* [online]. 1987 [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl1.pdf>>.
- [9] HORÁČEK, Milan. Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu.ppt. *VUT Brno : Odbor slévárenství ÚST*. [cit. 2010-04-26], 47s.
- [10] BOND, David, NISHIKAWA, Koji. *Investment Casting Wax Technology* [online]. 4. 1. 2006 [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>>.
- [11] Review of investment casting wax, Foundry Trade Journal, March 2004, Vol.178, No.3612, str. 82-86
- [12] MPI Incorporated. *Semi-automatic C-frame wax injector* [online]. 11. 5. 2007 [cit. 2010-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.mpi-systems.com/products/PDF/newproduct/55-Smart-Data_Spec-Sheets.pdf#page=1>.

[13] MPI Incorporated. *Large volume wax injection designed for Big part production*. [online]. 11. 5. 2007 [cit. 2010-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.mpi-systems.com/products/PDF/newproduct/35-Smart-Data_Spec-Sheets.pdf#page=1>.

[14] MPI Incorporated. *Wax Temperature and its Effect on Pattern-to-Pattern Repeatability* [online]. 8. 5. 2007 [cit. 2010-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.mpi-systems.com/media/MPI_Optimizing_Wax_Viscosity.zip>.