



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU V SOUČASNOSTI

PRESENT STATE OF INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUCIE SOUKUPOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lucie Soukupová

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

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

Technologie vytavitelného modelu v současnosti

v anglickém jazyce:

Present state of investment casting technology

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled nejnovějších trendů v technologii vytavitelného modelu z hlediska používaných surovin a zařízení.

Cíle bakalářské práce:

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

Seznam odborné literatury:

1. BEELEY, PR., SMART, RF. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
2. CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.
3. HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství. 2001, roč. LIII, č. 10, s. 570 –580. ISSN 0037-6825.
4. HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. In Proceedings of the World Technical Forum. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009, p. 35-43. ISBN 978-80-904020-2-7.
5. HORÁČEK, M. and CILEČEK, J. Capabilities of Investment Casting Technology, Livarski Vestnik. 2006, vol. 54, no. 4, p. 175-186. ISSN 0024-5135.
6. HORÁČEK, M. and CILEČEK, J. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets. Foundry Trade Journal. 2007, vol. 180, no. 3641, p. 32-35. ISSN 1758-9789.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o nejnovějších trendech výroby odlitků v technologii vytavitelného modelu, od výroby voskového modelu, keramické skořepiny, vytavování vosku, tepelného zpracování skořepiny až po odlévání a dokončující operace. V první části je uveden přehled světové výroby a použití přesně litých odlitků v současnosti a v dalších částech je rozebrán obecný postup s využitím nových technologií. Cílem této práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na nejmodernější zařízení a suroviny používané v technologii vytavitelného modelu a zkoušení voskových směsí a keramických obalových hmot.

Klíčová slova

Přesné lití, matečná forma, vosk, vytavitelný model, keramická skořepina, vytavování, žíhání, odlévání, odlitek

ABSTRACT

The Bachelor's thesis deals with the latest trends in investment casting technology, from wax pattern manufacture, ceramic shell manufacture, de-waxing, shell heat treatment up to metal pouring and finishing operation. In the first part, the outline of the world production and the usage of investment castings nowadays are introduced. The other parts of the project include the basic technique of using new technologies. The aim of this work is developing a literature search focused on the most modern equipment and raw materials that are used in investment casting technology and testing of wax mixtures and ceramic slurries.

Key words

Investment Casting, master die, wax, lost wax, ceramic shell, de-waxing, firing, metal pouring, casting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOUKUPOVÁ, Lucie. Technologie vytavitelného modelu v současnosti Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 56 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Technologie vytavitelného modelu v současnosti vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 27. 5. 2011 v Brně

.....
Lucie Soukupová

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
1. ÚVOD	9
2. HISTORIE	10
3. PŘEHLED SVĚTOVÉ VÝROBY ODLITKŮ	11
3.1 Výroba přesných odlitků ve světě	11
3.2 Trendy trhů přesně litých odlitků	11
3.3 Pohled do budoucnosti	14
4. PRINCIP TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU	15
5. VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU	16
5.1 Zhotovení formy na výrobu voskových modelů	16
5.1.1 Výroba formy podle matečného modelu	16
5.1.2 Výroba formy obráběním z kovových bloků	19
5.2 Zhotovení voskového modelu	19
5.2.1 Moderní voskové směsi	21
5.2.2 Regenerace a rekonstituce voskových směsí	22
5.3 Sestavování modelů	24
5.4 Zkoušení vosků	27
6. VÝROBA SKOŘEPINOVÉ FORMY A JEJÍ NOVÉ TECHNOLOGIE	30
6.1 Postupné obalování a sušení obalů	30
6.1.1 Příprava a odmaštění voskového modelu	30
6.1.2 Ponoření do obalové hmoty	31
6.1.3 Posyp modelů zrnitým keramickým materiálem	31
6.1.4 Sušení nebo chemické vytvrzování modelů	31
6.2 Vytavování voskové hmoty ze skořepin	32
6.2.1 Používané techniky pro vytavování vosku	33
6.3 Žihání keramických skořepin (vypalování)	34
6.4 Keramická jádra	35
6.5 Nové technologie ve výrobě skořepinových forem	36
6.6 Zkoušení keramické břechky	37
6.6.1 Proces kontroly a testování	37

7. ODLÉVÁNÍ	43
7.1 Klasické lití	43
7.2 Sklopné lití	44
7.3 Tavení a gravitační lití ve vakuu.....	44
7.4 Vakuové nasávání (CLA, CLV)	45
8. DOKONČUJÍCÍ OPERACE	45
8.1 Hrubé odstranění keramické skořepiny.....	46
8.2 Oddělení odlitků od vtokového systému	46
8.3 Odstranění zbylé keramiky.....	47
8.3.1 <i>Abrazivní metody</i>	47
8.3.2 <i>Chemické metody</i>	47
8.4 Dokončující operace	48
8.5 Kontrola jakosti odlitků	48
ZÁVĚR	49
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	54
SEZNAM OBRÁZKŮ	55
SEZNAM GRAFŮ.....	56

1. ÚVOD

Metoda vytavitelného modelu se řadí mezi moderní technologie přesného lití, v anglickém překladu „investment casting“, kde zastává důležitou pozici. Jako jedna z nejnáročnějších a nejsložitějších technologií dovoluje vyrábět velice přesné odlitky s tak dobrou jakostí povrchu, že mnohdy už nejsou nutné další dokončující operace, nebo jsou tyto operace sníženy na minimum. Z těchto důvodů je možno vyrábět odlitky velmi blízké hotovým výrobkům „téměř na hotovo“ („near net shape“). Díky tomu lze použít i materiály, které nelze jinými ekonomicky výhodnými technologiemi zpracovávat nebo je jejich výroba nemožná.

V dnešní době se sortiment s odlitky rychle rozrůstá a jsou kladeny čím dál větší požadavky na rozměrovou přesnost, jakost povrchu a materiálovou náročnost, to vše vede k dalšímu zdokonalování této technologie a k přímé, efektivní a ekonomické výrobě součástí.

Cílem této bakalářské práce je popsat proces a technologii odlévání metodou vytavitelného modelu a její nejnovější trendy. Především je zaměřená na zkoušení voskových směsí a keramických skořepin, nejmodernější zařízení, suroviny, výrobu voskového modelu, keramické skořepiny, na vytavování vosku a tepelné zpracování keramické formy před odlitím. V práci je také zmínka o uplatnění odlitků vyráběných touto metodou v jednotlivých oborech a ukázka nejmodernějších a nejzajímavějších součástí, které jsme schopni vyrobit.

2. HISTORIE [1], [2], [3]

Metoda vytavitelného modelu se řadí mezi nejstarší technologie lití na světě. Asi 5-6 tisíc let před naším letopočtem používali umělci včelí vosk na zhotovení modelů, které obalili hlínou a po vypálení do takto vytvořených forem odlévali bronz (obr. 1). Znalost procesu lití byla široce rozšířena v Antice a v době Krista byla praktikována v Číně, jihovýchodní Asii, Mezopotámii, Egyptě, Řecku, Itálii a severní Evropě, a možná i jinde. Velké využití této technologie nastalo v renesanci. Z tohoto období pochází mnoho uměleckých děl vyrobených metodou vytavitelného modelu, a jedním z představitelů této doby je Benvenuto Celliny, který produkoval mnoho mistrovských děl. Po renesančním rozkvětu došlo k zapomnění této metody a teprve v průběhu druhé světové války v letech 1940 až 1945 byla technologie přesného lití znovu objevena. Čím více se technologie zdokonalovala, tím více se rozšiřovala oblast využití přesného lití metodou vytavitelného modelu. Moderní doba jen převzala princip výroby, a až rozvoj vědy umožnil vypracovat nové modelové a formovací hmoty a moderní postupy doplněné mechanizací jednotlivých výrobních úseků

V dnešní době se přesné lití metodou vytavitelného modelu využívá například v leteckém průmyslu, v automobilovém průmyslu, v lékařství a dalších strojírenských oborech. Nesmíme také opomenout výtvarné umění, kterým vše započalo. Díky tomu, že od samotného počátku byly kladeny na přesně lité odlitky nejnáročnější požadavky, se tato technologie neustále rozvíjí a i v dnešní době je mnohé co zdokonalovat.



*Obr. 1 Hlava Ramsese II.
1292–1225 let před naším letopočtem [1]*

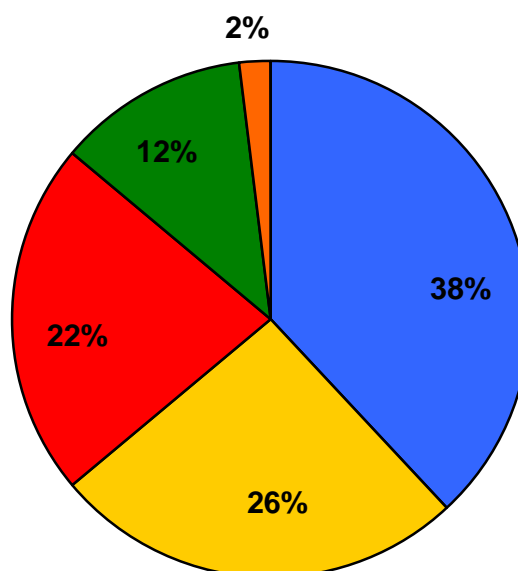
3. PŘEHLED SVĚTOVÉ VÝROBY ODLITKŮ

3.1 Výroba přesných odlitků ve světě [4], [5], [6]

Výroba odlitků metodou vytavitelného modelu se ve světovém měřítku neustále rozšiřuje. Z geografického hlediska lze výrobu rozdělit do několika teritorií, seřazených procentuálně dle vyráběného objemu odlitků. Severní Amerika (USA a Kanada) zůstává s 38 % největším trhem a zároveň výrobcem přesných odlitků. Evropa s výrobou 26 %, Čína 22 %, Asie 12 % a zbytek světa doplňuje statistiku o 2 % (graf 1). Možné odchylky od uvedeného stavu jsou dány tím, že neexistují spolehlivé údaje o výrobě odlitků především v Rusku a Číně.

Objemy prodeje odlitků TVM

■ Severní Amerika ■ Evropa ■ Čína ■ Asie ■ Ostatní trhy



Graf 1 Objemy prodeje odlitků ve světě [6]

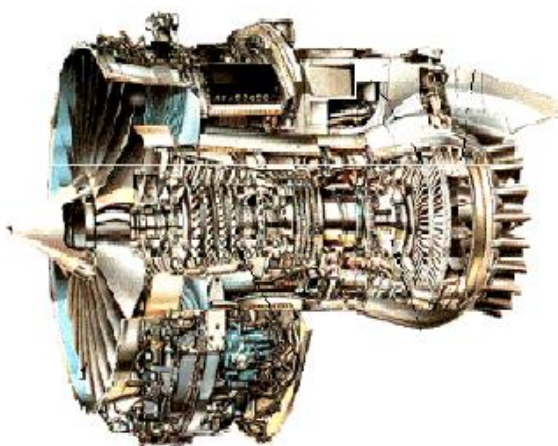
3.2 Trendy trhů přesně litých odlitků [4], [5], [6], [7], [8]

Rozsah zákazníků pro odlitky lité technologií vytavitelného modelu je obrovský. K nejvýznamnějším patří letecký průmysl, kosmický, energetický, automobilový, nezanedbatelné je i využití v lékařství a mnoha dalších oborech. Značné možnosti vzrůstu výroby jsou také v oblasti odlitků z neželezných slitin, především z důvodů dobrých rozměrových tolerancí, jakosti povrchu, možnosti zhotovení tenkostěnných odlitků a také s ohledem na jejich vyšší užitné vlastnosti. Velké uplatnění se nachází v automobilovém průmyslu, kde je využití přesně litých odlitků až 70 %. Také odlitky ze slitin mědi mají mnohem vyšší šance se uplatnit v praxi, než tomu bylo doposud.

1) Letecký průmysl [1]

Na rozsah průmyslu přesného lití měl především vliv letecký průmysl a rozvoj tryskových motorů (obr. 2). Změna plánů výroby letadel měla za následek pokles prodejů odlitků až o 20 %, nicméně objednávky letadel zůstávají na vysoké úrovni. Firmy Airbus a Boeing představily nové modely letadel a Čína vstoupila na trh s letadly ARJ21-700 a C919 „Jumbo“, plánované do výroby v roce 2014. Také prodej náhradních součástí do letadel se postupně zlepšuje.

Pro zlepšení struktury odlitků jsme díky novým poznatkům schopni řídit směr krystalizace kovu a jeho tuhnutí. Toho je využíváno při odlévání lopatek leteckého motoru, kde jsme schopni dosáhnout rovnoosé struktury, usměrněné krystalizace, a dokonce je možné vyrobit součásti jako jeden velký monokrystal (obr. 3). Lopatky jsou ze superslitiny na bázi niklu, odlévané ve vakuu. Tuto technologii je dále možné použít pro součásti namáhané v jednom směru.



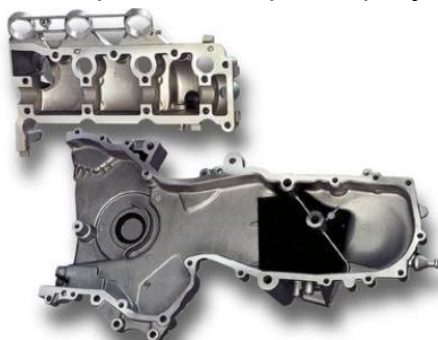
Obr. 2 Tryskový motor [9]



Obr. 3 Lopatka leteckého motoru - rovnoosá struktura, usměrněná krystalizace, monokrystal [10]

2) Automobilový průmysl

Automobilový průmysl reprezentuje obecně ve světě největší potenciál pro aplikace odlitků přesného lití. Výroba osobních i nákladních aut byla ovlivněna ekonomickou recesí již od poloviny roku 2008. Došlo ke ztrátě mnoha pracovních míst a mnoho výrobců pozastavilo výrobu. Méně postižené byly asijské trhy a například v Indii prodeje aut klesly jen mírně. Obecně lze také říci, že prodej menších aut s ekonomickou spotřebou se rozvíjí dobře a například výroba turbodmychadel do motorů v Japonsku se opět zlepšuje.



Obr. 4 Odlitky pro automobilový průmysl [11]

3) Zdravotnictví [12]

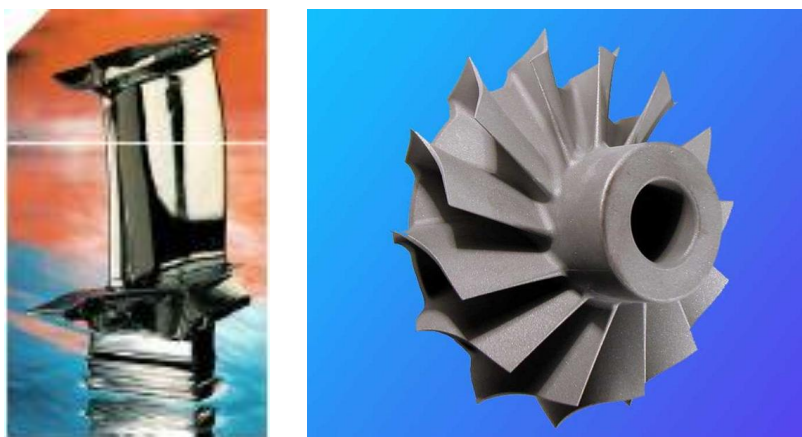
Čím dál větší uplatnění nacházejí přesně lité odlitky ve zdravotnictví, například v podobě kloubních náhrad (obr. 5). V poslední době, především na západních trzích, však došlo ke snížení poptávky těchto náhrad v důsledku poklesu chirurgických operací. Nicméně výrobci považují stále úroveň zakázek za docela dobrou a v některých případech dokonce za zvyšující se.

Při totální endoprotéze dochází k velkému chirurgickému zásahu do zdravé kosti. Je to zapříčiněno tím, že kloubní náhrady jsou vyráběny v omezených velikostech a kost se musí před nasazením na tuto velikost upravit (osekat). Aby k těmto drastickým zákrokům nedocházelo, vyvinul se postup výroby přesných kloubních náhrad pro daného pacienta. Chirurgický zákrok se minimalizuje a díky rychlosti nových metod přesného lití jsme schopni vyrobit náhradu již za 6 týdnů. Avšak kvůli finanční náročnosti tato metoda stále čeká na realizaci.



Obr. 5 Kloubní náhrady - kyčelní, kolenní [12], [13], [14]

4) Energetika



Obr. 6 Odlitky pro energetiku [9], [15]

5) Zbrojní průmysl



Obr. 7 Přesně lité odlitky pro zbrojní průmysl [16]

6) Sportovní příslušenství



Obr. 8 Golfové hole [17]

7) Hydraulika a armatury

8) Lodní průmysl

9) Potravinářství

3.3 Pohled do budoucnosti [5], [6], [7]

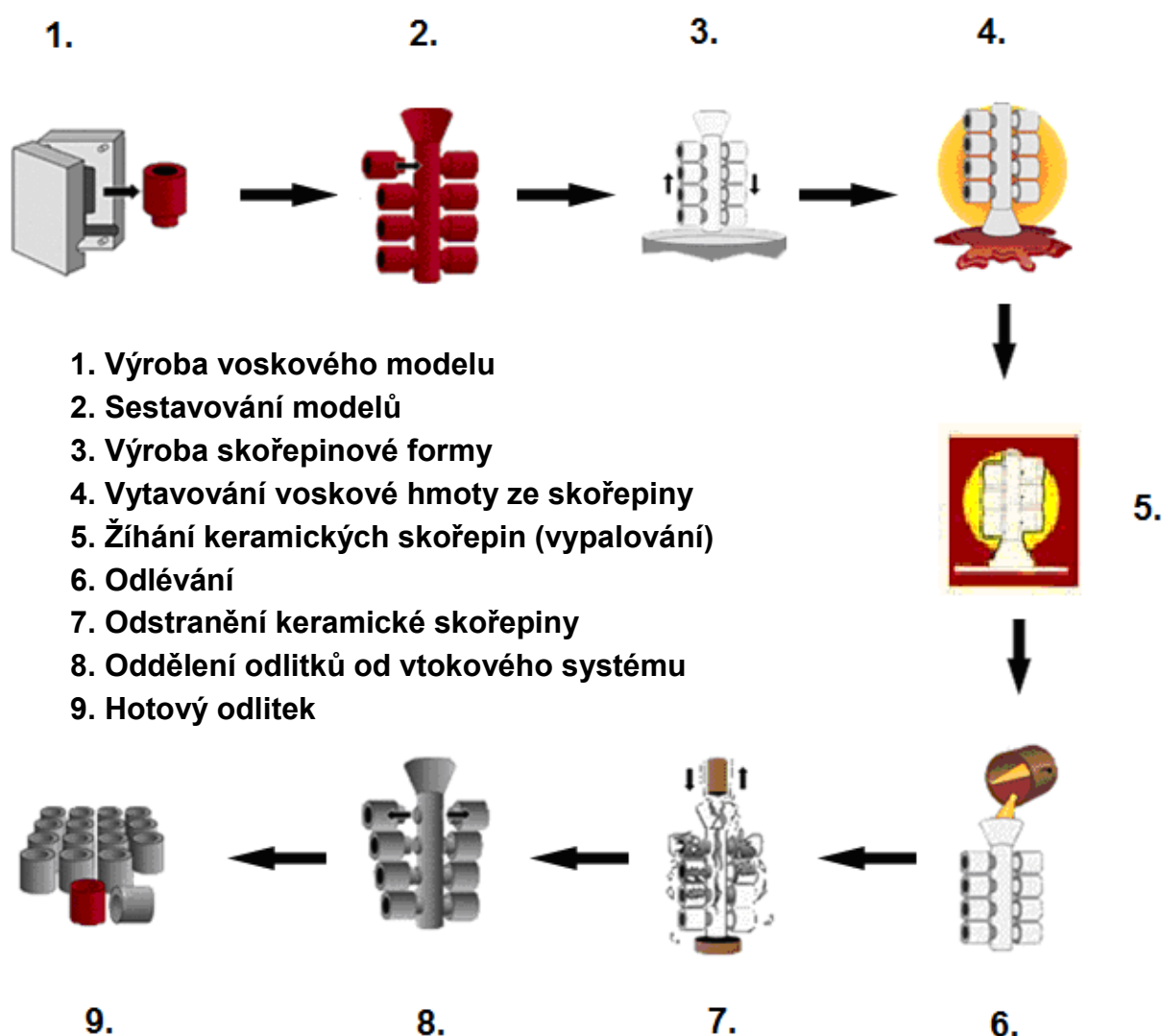
Tržní podmínky s odlitky se po globální hospodářské krizi začínají stabilizovat. Nové možnosti v odlévání metodou vytavitelného modelu lze očekávat v leteckém průmyslu výrobou více efektivních motorů, v oblasti energetiky, automobilovém průmyslu ve vývoji hybridních a elektrických pohonů vozidel, pokrokovými palivovými a výfukovými systémy a dalším rozvojem zdravotnických potřeb.

Příležitosti pro odlitky odlévané metodou vytavitelného modelu jsou obrovské, avšak ani konkurenční technologie lití nespí, proto jen slévárny s využitím nejnovější technologie ztraceného vosku mají šanci být úspěšné. To představuje schopnost vyrábět složité tvary s velmi vysokou rozměrovou přesností.

4. PRINCIP TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Metoda vytavitelného modelu je charakteristická procesem, kde se do zhotovené matečné formy vstříkáním vyrobí voskový model, který se s ostatními modely připojí k vtokovému systému. Postupným nanášením keramické hmoty na voskový stromeček a posypáním žáruvzdorným materiálem je vytvořena keramická skořepina, z které je následně vosk vytaven a skořepina tepelně zpracována žiháním. Do takto připravených žhavých forem odléváme. Po všech zmíněných operacích následuje odstranění skořepiny, oddělení odlitků od vtokové soustavy řezáním, oddělení vtoků od odlitků broušením a dokončovací operace jako je tryskání, broušení a leštění.

Výroba odlitků metodou vytavitelného modelu je zobrazena na obrázku (obr. 9). Jednotlivé fáze jsou dále rozvedeny v následujících podkapitolách [7], [18].



Obr. 9 Princip technologie vytavitelného modelu [19], [20]

5. VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU [1], [21], [22]

Výroba voskového modelu patří mezi nejdůležitější fáze zhotovení přesného odlitku. Tvar dutiny matečné formy kopíruje tvar budoucí součástky a z tohoto důvodu jsou kladené velké nároky na její zhotovení. Konečné rozměry a dosažitelná přesnost matečné formy je dána zvolenou technologií její výroby a konečné rozměry a dosažitelná přesnost voskových modelů závisí na způsobu výroby voskového modelu (nejčastěji vstřikováním) a zvolených parametrech vstřikování. Vstřikovací parametry a jejich změny jsou prakticky jedinou možností ovlivňování konečných rozměrů voskového modelu, a tedy i konečného odlitku.

Znalost jednotlivých faktorů je nezbytná při zadávání rozměrů matečné formy výrobcí. Rozměry formy v sobě musí zachycovat všechny následné rozměrové změny tak, aby na konci technologického toku při zhotovení odlitku bylo dosaženo zákazníkem požadovaných rozměrů v rámci předepsaných tolerančních polí. Z tohoto důvodu má modelové zařízení velký vliv na cenu a kvalitu odlitku.

5.1 Zhotovení formy na výrobu voskových modelů [10]

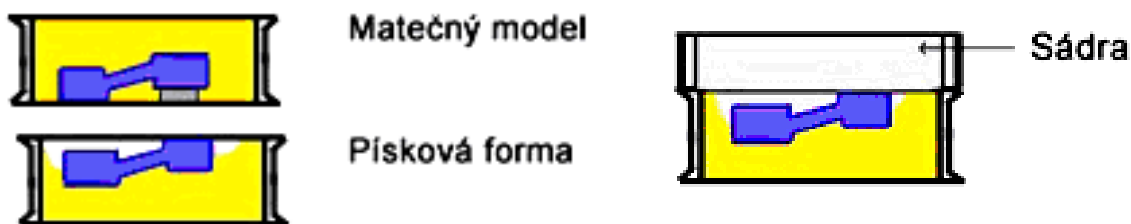
Forma pro výrobu voskových modelů musí splňovat nejrůznější požadavky, jako je například umožnění výroby kvalitních modelů s dobrou drsností povrchu, bez vzduchových bublin, staženin a dalších vad s požadovanou rozměrovou přesností, a dále s co nejkratší dobou setrvání voskových modelů ve formě po jejich odstříknutí.

Dle účelu a použití forem rozeznáváme formy k výrobě vlastních voskových modelů a k výrobě vtoků, nálitků apod. Dle stupně mechanizace s ručním vyjímáním modelů, s vyhazovači modelů a celkově mechanizované a automatizované pracoviště. Dále lze formy dělit podle konstrukce, způsobu jejich výroby (podle matečného modelu nebo obráběním) a použitých materiálů.

5.1.1 Výroba formy podle matečného modelu

1) Formy ze sádry

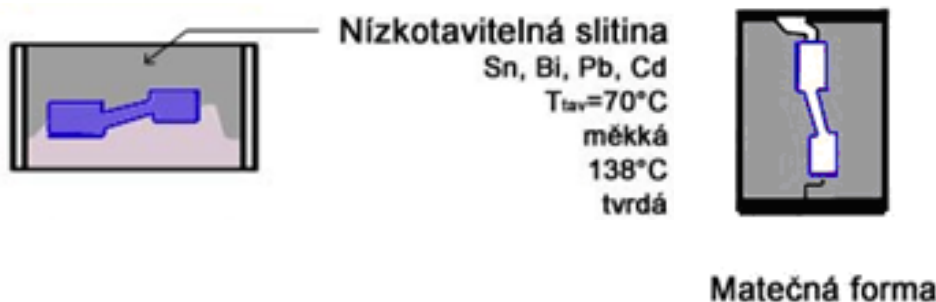
Vyrábějí se zalitím matečného modelu sádro. Životnost těchto forem je minimální. Jejich využití nalezneme při výrobě jednotlivých modelů bez velkých nároků na přesnost a zvláště při ověřování navrhované technologie výroby. Plnění voskovou směsí probíhá volným gravitačním litím.



Obr. 10 Výroba formy zalitím matečného modelu do sádry [10]

2) Formy z nízkotavitelných slitin

Kovový matečný model je z jedné poloviny zalit nízkotavitelnou slitinou, otočen a z druhé poloviny je usazen do ocelového pláště. Výhodou těchto forem je rychlá a jednoduchá výroba. Pro jejich nízkou životnost se používají k výrobě menších sérií voskových modelů.



Obr. 11 Forma z nízkotavitelné slitiny [10]

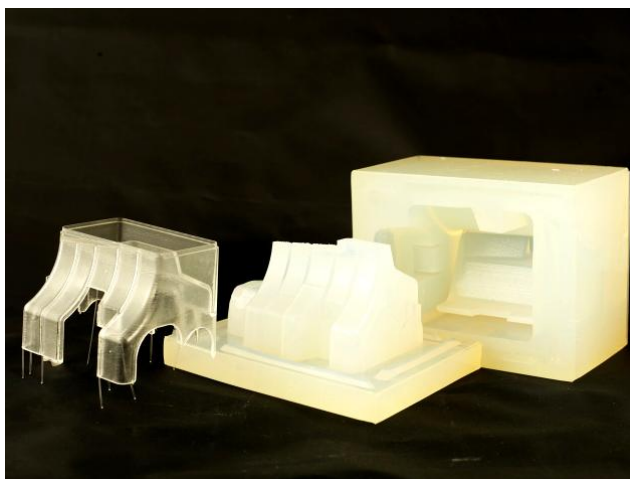
3) Formy ze zinkových slitin

Postup výroby je stejný jakou forem z nízkotavitelných slitin s tím rozdílem, že místo nízkotavitelné slitiny se používá zinková slitina. Tyto formy jsou oproti předchozím tvrdší a mnohem lépe odolávají opotřebení, jsou vhodné pro větší série.

4) Formy ze silikonového kaučuku [23]

Jsou vyráběny zalitím matečného modelu silikonovým kaučukem. Tyto formy jsou používány pro ověřování navržené technologie odlitku nebo pro bižuterii.

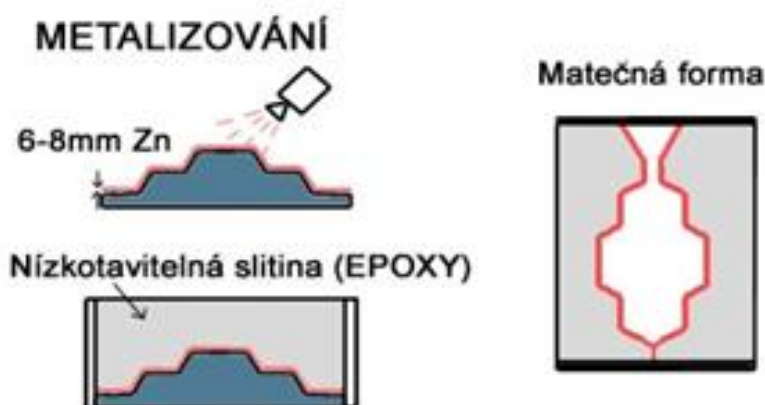
Mezi velké výhody těchto forem patří snadné odlévání tvarově velmi složitých součástí, tenkostěnných modelů, modelů s negativními úkosy, ale i nízká cena. Podle posledních výzkumů lze říci, že z hlediska rozměrového a z hlediska jakosti povrchu jsou silikonové matečné formy, plně vyhovující pro menší série odlitků.



Obr. 12 Forma ze silikonového kaučuku [23]

5) Formy vyrobené metalizováním

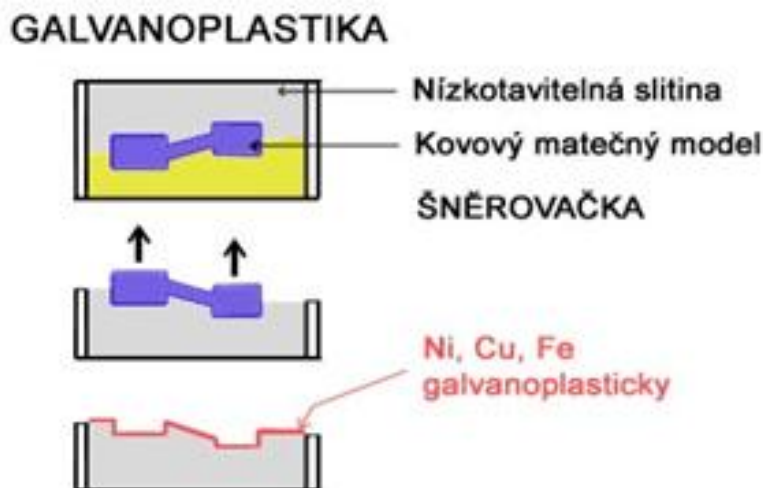
Princip výroby spočívá ve vrhání a natavení roztavených částic kovu metalizační pistolí na povrch matečného modelu, kde se rozprášené tekuté částice kovu deformují, spojují a vytvářejí souvislou vrstvu, která přesně kopíruje všechny tvary. Po dosažení tloušťky vrstvy asi 3 mm se vzniklá kovová skořepina zalije epoxidovou pryskyřicí. Výroba je velmi rychlá, levná a mezi další výhody patří vysoká životnost a použití i pro velmi komplikované dělicí roviny s dobrou kvalitou voskového modelu. Nevýhodou je složitá úprava formy.



Obr. 13 Výroba formy metalizací [10]

6) Formy vyrobené galvanoplasticky

Výroba forem funguje na principu elektrolýzy. Matečný model se ponoří do elektrolytu, kde se na něj nabalí vrstvička kovu o tloušťce 0,4-4 mm. Poté se takto vzniklá skořepina zalije epoxidovou pryskyřicí nebo slitinou hliníku jako u metalizování. Tato metoda umožňuje výrobu forem, které nelze vyrobit žádnou metodou obrábění.



Obr. 14 Výroba formy pomocí galvanoplastiky [10]

5.1.2 Výroba formy obráběním z kovových bloků

Formy vyrobené obráběním jsou používány tam, kde se požaduje velkosériová výroba a dlouhodobá životnost. Při tomto způsobu výroby není potřeba matečný model jako u předchozích technologií, i přesto výroba těchto forem patří mezi nejnákladnější. Materiál na zhotovení forem obráběním se používá ocel a slitiny hliníku. Modely vyrobené v těchto formách jsou velice přesné, avšak pokud se v odlitku nacházejí dutiny, které jsou mimo dělicí plochu, musí být použito výsuvných jader a jejich umístění ve formě je velice složité a pracné.



Obr. 15 Forma vyrobená obráběním [24]

5.2 Zhotovení voskového modelu [10]

Vosková směs, vhodná pro daný výrobek, se plní odpovídajícím tlakem do forem. Ty mohou být jednoduché nebo vícenásobné. Pro snazší vyjímání voskových modelů z dutiny formy se používá separátor, ten zabraňuje případnému nalepování modelové směsi na stěny formy.

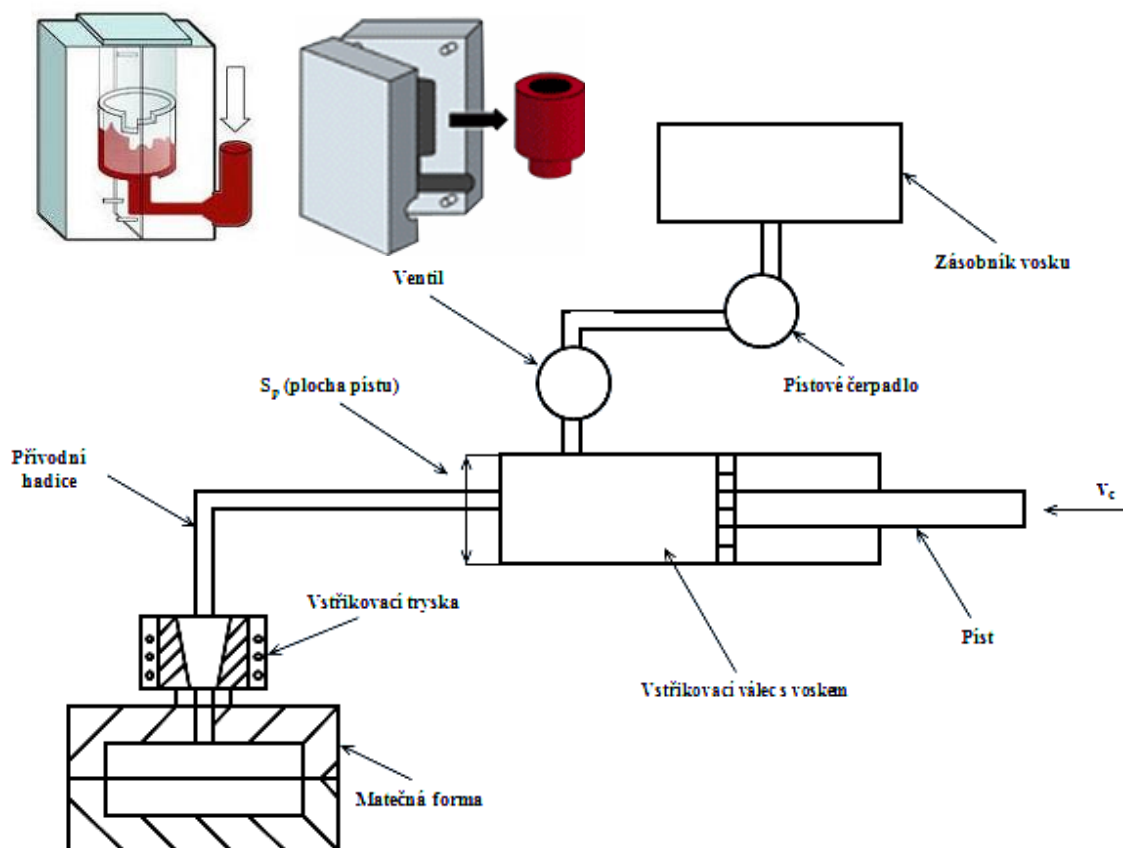
Voskový model může být zhotoven dvěma způsoby, buď gravitačním litím, nebo vstříkovaním.

1) Gravitační lití

Používá se velice zřídka, a to především pro výrobu jednoduchých modelů nebo vtokových kanálů apod.

2) Vstřikování do formy

Výroba modelů vstřikováním je hlavní metodou výroby voskových modelů. Do formy se pod tlakem vstřikuje vosk na speciálních vstřikovacích lisech. Teplota vosku při vstřikování se pohybuje mezi 55-90 °C. Po ztuhnutí je model vyjmut z formy (obr. 16). Takto zhotovené modely je nutno očistit od otřepů z dělicí roviny a připravit pro montáž do sestav - stromečků.



Obr. 16 Princip vstřikování vosku do formy [10], [19], [25]

Existují tři základní typy vstřikovacích strojů:

a) Vstřikovací stroj pracující s tekutým voskem

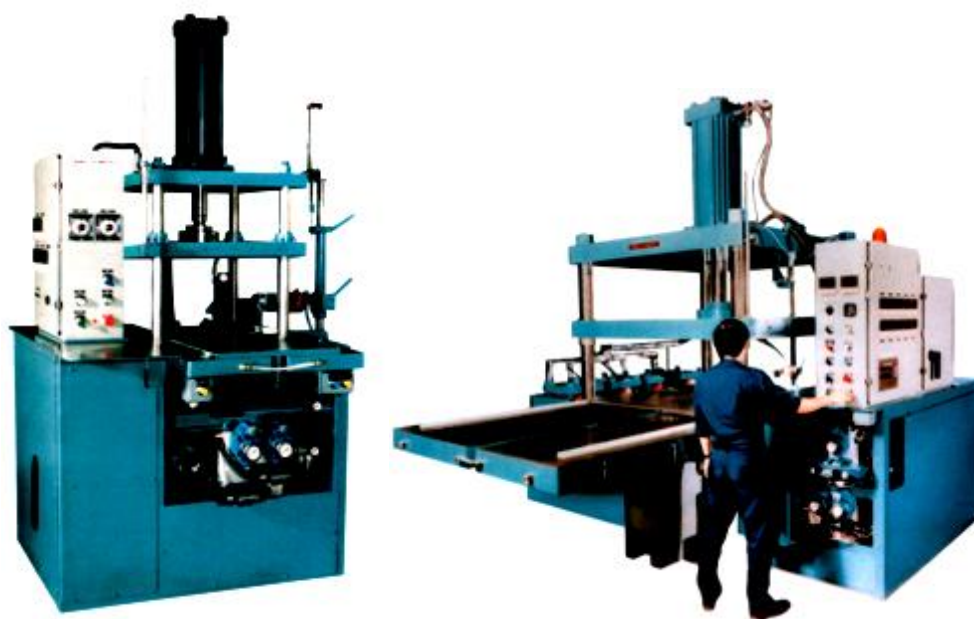
Stroj pracuje s nízkým vstřikovacím tlakem (0,5-1 MPa) a vosková hmota je vstřikována v tekutém stavu.

b) Vstřikovací stroj pracující s kašovitým voskem

Stroj pracuje s vyšším vstřikovacím tlakem (2,5-5 MPa). Používaný vosk se vstřikuje v těstovitém stavu. Voskové modely mají horší kvalitu povrchu, ale jsou rozměrově přesnější.

c) Vstřikovací stroj pracující s tuhým voskem

Stroj používá předpřipravené voskové polotovary ohřáté na požadovanou teplotu.



Obr. 17 Vstřikovací stroj [10]

5.2.1 Moderní voskové směsi [9], [10], [26], [27], [28]

K výrobě vytavitelných modelů se používají voskové směsi, protože samostatný vosk nesplňuje dané požadavky kladené na modelovou hmotu. V dnešní době jsou vosky komplexní materiály, složené ze složek, jako jsou přírodní vosky, syntetické vosky, přírodní pryskyřice, syntetické pryskyřice, organická plnidla a voda.

Výrobci se stále snaží voskové směsi zdokonalovat a především je kladen velký důraz na kontrolu jakosti voskové směsi. V budoucnu slévárny očekávají nízkou cenu vosku, vysokou kvalitu a snadnou regeneraci nebo náhradu vosku za jiný vhodný materiál.



Obr. 18 Voskové směsi [9]

Kombinací různých vlastností surovin lze u vosků dosáhnout optimálních charakteristik, a to:

- bod tavení a tuhnutí,
- tvrdost,
- viskozita,
- roztažnost smrštitivost,
- rychlost tuhnutí,
- obsah popela (< 0,05 %),
- pružnost,
- povrchová kvalita,
- stabilita vůči oxidaci,
- možnost regenerace.

K výrobě voskových modelů se používá několik druhů voskových směsí, které mají různou použitelnost a vlastnosti.

1) Modelové vosky

a) Přímé (neplněné) modelové vosky: sloučeniny více vosků a pryskyřičných komponentů. Mohou být vstřikovány za různých vstřikovacích tlaků v širokém teplotním rozsahu. Jsou lehce recyklovatelné.

b) Plněné modelové vosky: základní materiál mají podobný jako přímé vosky, avšak do směsi je přidáváno práškové plnivo, nerozpustné v základním vosku, které zvyšuje stabilitu směsi. Tyto vosky poskytují kvalitní povrch modelu a mají dobré vstřikovací vlastnosti.

c) Emulzifikované modelové vosky: materiál je podobný jako u přímých a plněných vosků, které jsou emulgovány vodou. Povrch těchto modelů je skelně hladký.

2) Vosky na vtokové soustavy

3) Regenerované vosky a rekonstituované vosky

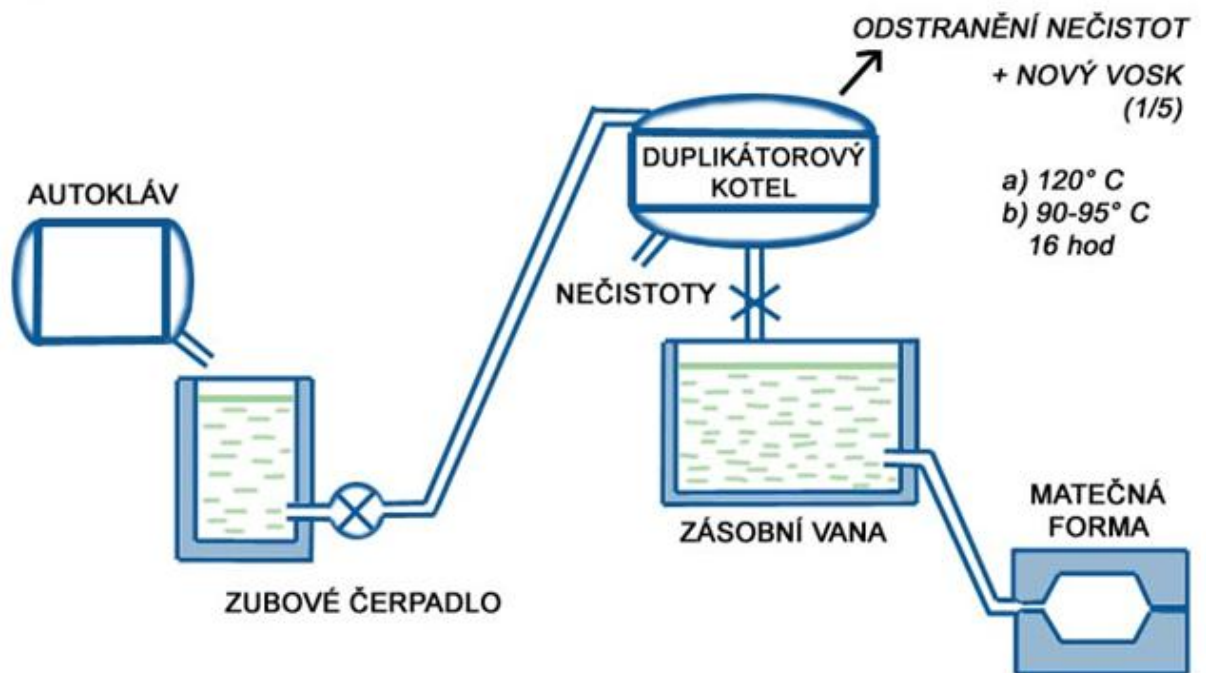
4) Vosk rozpustný ve vodě: pro vnitřní tvary

5) Speciální vosky

5.2.2 Regenerace a rekonstituce voskových směsí

Hospodářské a ekologické trendy vedly k tomu, že obnova vosků se zařadila mezi důležité obchodní činnosti dodavatelů. Dříve se regenerované vosky používaly jen na výrobu vtoků a nálitků, v dnešní době už mají tyto vosky vlastnosti jako panenské vosky. Jednou z důležitých částí procedury regenerace a rekonstituce je kontrola kvality, testování a zpětné přizpůsobení specifikaci pomocí přísad.

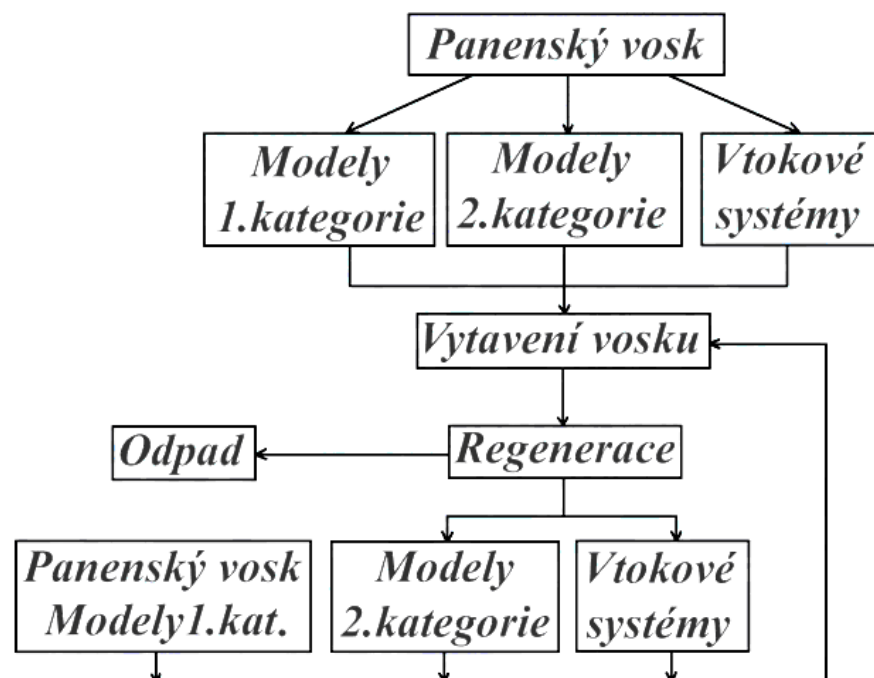
REGENERACE VOSKOVÉ SMĚSI



Obr. 19 Regenerace voskové směsi [10]

- **Regenerace**

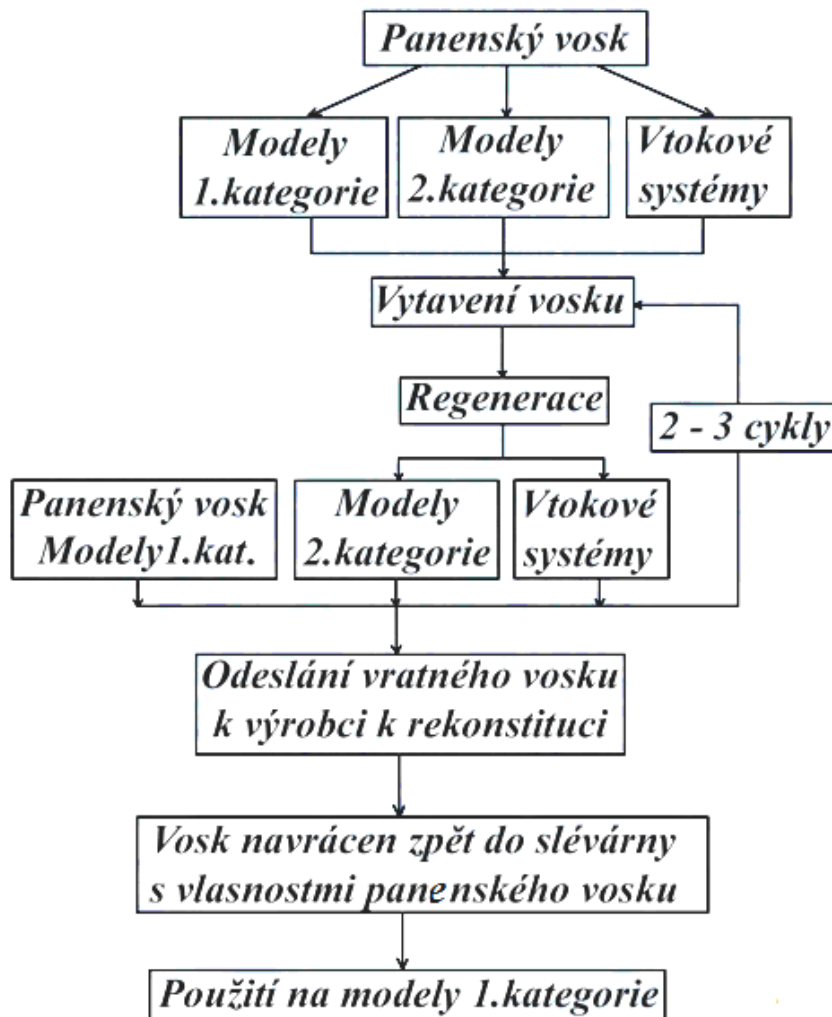
Nejčastější způsoby regenerace jsou sedimentace, filtrace, odstředivý způsob.



Obr. 20 Schéma regenerace voskové směsi [26]

- **Rekonstituce**

Je to proces, při kterém je vosk vytavený slévárnou v autoklávu nebo jinak použitý vosk známého druhu vyčištěn a smíchan s novými surovinami.



Obr. 21 Schéma rekonstituce voskové směsi [26]

5.3 Sestavování modelů [10]

Modely se vyrábějí ve formách jednotlivě a jsou připojeny na vhodně zvolené místa vtokové soustavy. Kusové a tvarově složité odlitky vyžadují zvláštní vtokové systémy. Velkosériově vyráběné kusy jsou připevňovány na vtokový kúl, který zároveň slouží jako nálitek a zajišťuje doplňování kovu při tuhnutí.

Připojení modelů ke vtokové soustavě se provádí dvěma způsoby, pájením a lepením. Při pájení se mezi vtok modelu a vtokový systém vloží pájedlo. Poté se model na pájedlo, které je přiloženo na určené místo vtokového systému, přitlačí a po natavení dosedacích ploch se pájedlo vytáhne a model přitiskne k vtokovému systému. Drobné modely jsou k vtokovému systému připojeny voskovým lepidlem. Při tomto procesu je důležité, aby lepidlo smáčelo celou plochu vtoku a při přitlačení modelu vytvořilo prstencový přetok.

Podle počtu modelů v jedné lici soustavě se rozlišují:

- **Sestavy jednotlivých modelů**

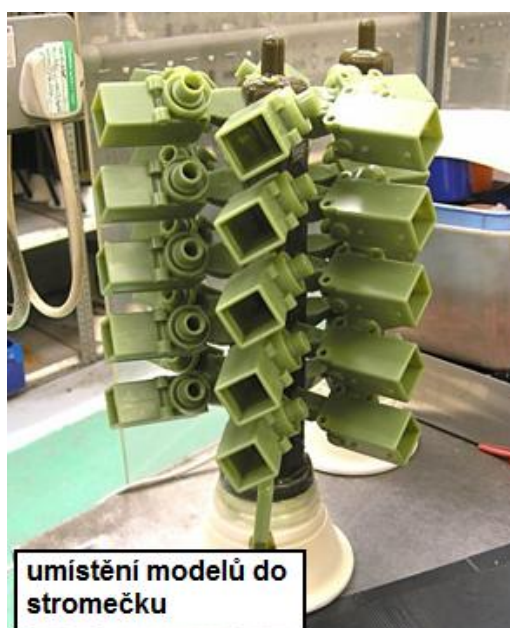
Používají se u rozměrnějších odlitků nad 2 kg, nebo pro složitě členité odlitky. Vtoková soustava, která má různé druhy náliček, se vyrábí ve zvláštních formách a na model se připojí pájením, nebo lepením (obr. 22).



Obr. 22 Sestava jednoho modelu [29]

- **Sestavy více modelů do tzv. stromečků**

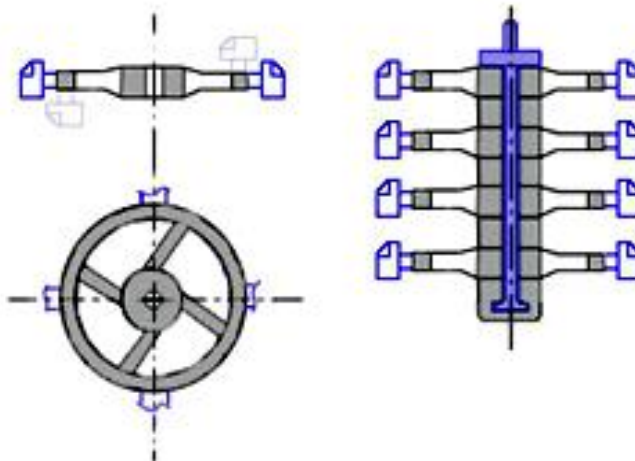
Modely drobných odlitků se sestavují do sestavy nazvané stromeček, kde jsou spojeny jednotlivými vtoky a vtokovou soustavou. Modely se na vtokovou soustavu připojují buď lepením, nebo pájením (obr. 23).



Obr. 23 Sestava modelů do stromečku [30]

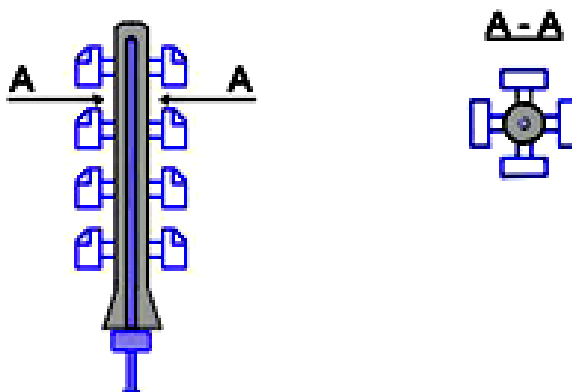
Způsob připojení modelů do stromečku se dělí:

- Modely sestavené horizontálně (obr. 24)



Obr. 24 Modely sestavené horizontálně [10]

- Modely připojeny přímo na vtokový kanál (obr. 25)



Obr. 25 Modely připojeny na vtokový kanál [10]

Tvar stromečku musí být navržen tak, aby byl umožněn bezproblémový přístup k připojení modelů, a tím nedošlo při lepení nebo pájení k poškození modelů, které jsou na stromečku už připevněny. Umístění modelů na vtokovém systému musí být optimální, aby po nanesení poslední vrstvy obalu byla mezi jednotlivými modely mezera a při vytavování modelů ze skořepiny bylo umožněno bezproblémové vytékání vosku. Pokud vhodná poloha modelu na stromečku neumožní dokonalé vytavení vosku, je nutno k modelu připojit pomocný výfuk nebo jiné pomocné otvory. Další faktory, ovlivňující tvar stromečku, jsou technika obalování, způsob vytavování, způsob lití a oddělování odlitků od vtokové soustavy. V dnešní době je snaha o standardizování vtokových soustav pro zjednodušení technologických postupů a následné manipulace.

5.4 Zkoušení vosků [28], [31], [32]

Kontrola vlastností vosku je velice důležitá jak pro výrobce, tak i pro slévárnu, a proto je nezbytně nutné dodržovat kontrolní procedury. Tím dojde k vyhovění daným specifikacím a zvážení prodeje tohoto vosku.

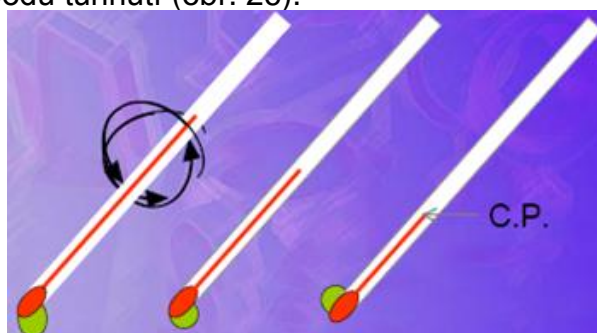
Testování fyzikálních vlastností

- bod tavení,
- bod tuhnutí,
- obsah popelovin,
- penetrace,
- viskozita,
- zabíhavost,
- množství vody,
- mechanická pevnost,
- nové testy - DSC, oscilace, objemová roztažnost.

1) Bod tuhnutí

Bod tuhnutí je teplota, při které vlivem gravitace přestane malá kulička vosku téci. Teplota, při které dojde k přeměnění skupenství vosku z plastického na pevné se nazývá C.P. (bod tuhnutí) a je závislá na celkovém složení voskové směsi. Zkouška bodu tuhnutí je důležitá z hlediska vstřikovacích vlastností.

Princip zkoušky spočívá v roztavení voskového vzorku na vařiči tak, aby nedošlo k jeho přehřátí. Do vosku, který se ochladí na 20-30 °C nad bodem tuhnutí se vloží teploměr a teplota se znovu nechá klesnout o 10 °C. Poté se teploměr vyjme s vrstvičkou vosku na špičce. Po umístění teploměru do horizontální polohy se vytvoří vosková kulička a po jejím ztuhnutí lze na stupnici odečíst hodnotu bodu tuhnutí (obr. 26).

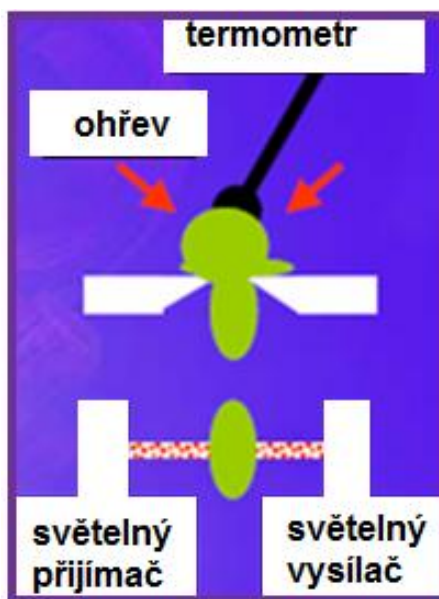


Obr. 26 Kontrola voskové směsi - bod tuhnutí [32]

2) Bod tavení (skápnutí)

Test je proveden na jediné ohřátí známého ztuhlého voskového vzorku, dokud dnem nádoby nevyteče první kapička. Světelný paprsek detekuje kapičku roztaveného vzorku a příslušná teplota se zaznamená zapisovačem dat.

Při testování se vzorek zahřeje na teplotu tavení a vlije do připravené nádoby bez přístupu vzduchu. Naplněná nádoba se chladí asi 30 minut, a poté je umístěna do odběrové trubice, která se nejprve zahřeje na 20 °C pod předpokládanou teplotou a ohřev skončí 20 °C nad předpokládanou teplotou. Jakmile dojde k propadnutí první kapičky vosku, výsledek se zobrazí na displeji přístroje (obr. 27). Měření je možno provádět jen u vosků s nízkou viskozitou za zvýšené teploty.

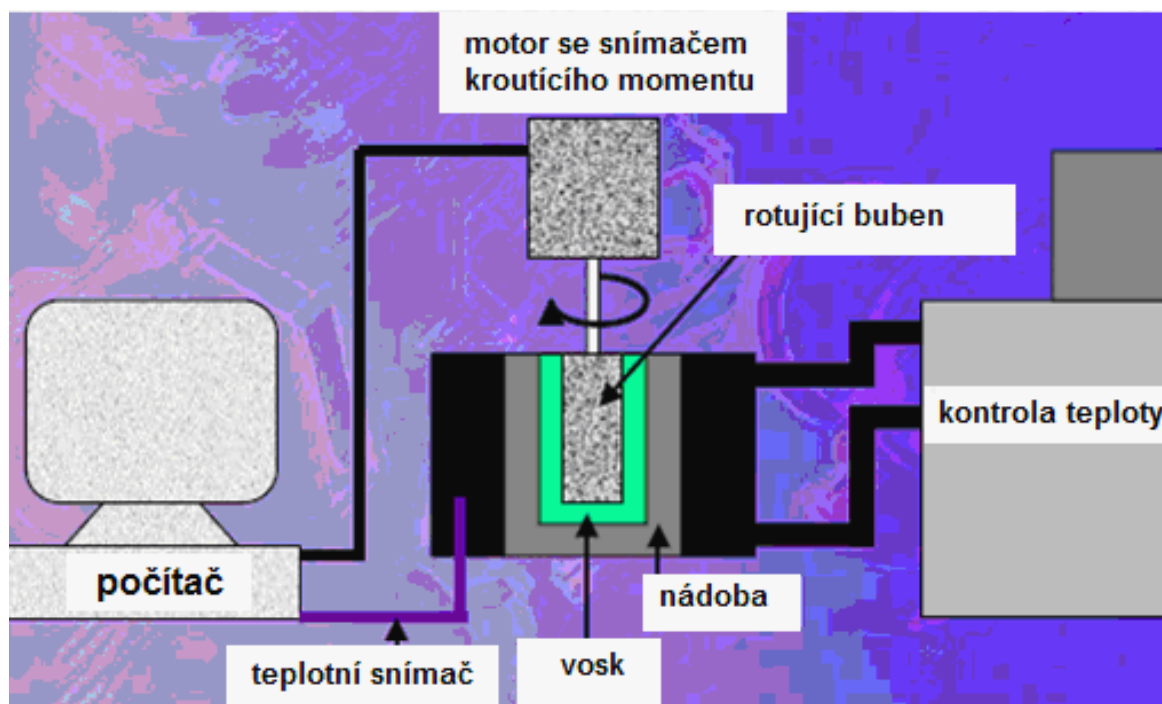


Obr. 27 Kontrola voskové směsi - bod tavení [32]

3) Viskozita

Viskozita je závislost změny tekutosti vosku na teplotě a její znalost umožňuje dobré zobrazení charakteristik tečení, které se využívají při vstřikování a vytavování voskové směsi.

Při teplotě 80 °C je vosk nalit do nádoby, kde se nechá stabilizovat. Pomocí motoru se známými parametry se teplota postupně snižuje a snímačem krouticího momentu se zpracovávají data k udržení stejné rychlosti otáček motoru. Jak vosk postupně chladne, viskozita roste a k udržení konstantních otáček je potřeba více síly, která je s ostatními informacemi zaznamenávána do grafu (obr. 28).



Obr. 28 Kontrola voskové směsi - viskozita [32]

4) Zkouška zabíhavosti

Čím více je vosk viskózní, tím méně teče. Teplota, tlak a průtokové podmínky jsou zachovány. Vosk je vstřikován do speciální formy - spirály „zabíhavosti“ (obr. 29) o známých parametrech a podle značek vyrytých ve formě se zjišťuje, jak daleko vosk dotekl.



Obr. 29 Zkušební forma „zabíhavosti“ [28]

5) Obsah popelovin

Touto metodou se zjišťuje obsah popelovin, které jsou nežádoucí nečistotou ve voscích, voskových směsích a dalších materiálech, ve kterých se popel nachází. Vosky s vysokým obsahem popelovin způsobují viditelné defekty na dokončených voskových modelech.

Porcelánový kelímek se ohřeje na teplotu 700-800 °C po dobu asi 10 minut. V přenosné chladicí nádrži je ochlazen na pokojovou teplotu a zvážen. Postup vážení se provádí třikrát a průměrná hodnota se zaznamená. Do kelímku se přidá 10 gramů vzorku a znovu se třikrát zváží. Poté se kelímek zahřívá na tak vysokou teplotu, až dojde ke vznícení jeho obsahu. Kelímek se umístí do speciální pece, ochladí a vážení se opakuje. Tímto postupem se získá obsah popelu ve vzorku.

6) Penetrace

Penetrace je definována jako tvrdost vosku, která se měří hloubkou díry po vniku jehly do zkoušeného materiálu. Vzorek s vyšší penetrací je měkčí než vzorek s nižší penetrací. Tvrdost má vliv na celkovou pružnost vosku.

Test se uskutečňuje při teplotě 25 °C. Jakmile je vzorek připraven, sjede se jehlou na dotyk voskového vzorku, kde se uvolní a po jejím opětovném zajištění se odečte hloubka penetrace.

7) Mechanická pevnost

Díky mechanickým vlastnostem jsou vosky ideální pro zpracování modelů. Jsou tvrdé, křehké, a tím může dojít k jejich poškození při sestavování do stromečků, avšak vosky příliš měkké a ohebné neposkytují dostatečnou pevnost během výroby skořepiny.

Ke kontrole se používá tříbodová technika ohýbání. Ručně lité nebo vstříkované zkušební tyče se testují na tlakovém a tahovém stroji a počítačem jsou zaznamenávána data, která charakterizují zkoušený materiál.

8) DSC – diferenciální skenovací kalorimetrie

Tato analýza zjišťuje údaje o roztavených fázích různých sloučenin. Oscilace dává údaje o smykových vlastnostech vosku a dále se zjišťuje objemová roztažnost.

6. VÝROBA SKOŘEPINOVÉ FORMY A JEJÍ NOVÉ TECHNOLOGIE [1], [10], [21]

Charakteristickým znakem metody vytavitelného modelu je nedělená samonosná forma. Model pro zhotovení formy se vždy zničí vytavením a pro každou formu je nutné použít nový. Díky vlastnostem keramických forem je široká škála možností využití přesného lití a ještě větší výběr slitin. To znamená, že metodou vytavitelného modelu lze vyrobit takové tvary, které by jinou metodou nebylo možné dosáhnout.

Existují však určitá úskalí tohoto procesu, která vyžadují zvláštní pozornost. Vosky mají poměrně velkou tepelnou roztažnost. Oproti tomu se skořepiny vyznačují malou roztažností a mezi tepelnou roztažností voskových směsí a skořepin se nacházejí odlévané slitiny. Tyto rozdíly vytvářejí nerovnováhu ve výrobě odlitků a následně jejich přesnosti, které je třeba ovlivňovat a řešit. Vlivem dalších charakteristik procesu, týkajících se rozměrových změn, je konečný rozměr odlitku odlišný od rozměru výchozího voskového modelu

6.1 Postupné obalování a sušení obalů

Keramická skořepina se obalováním zhotoví kolem celého voskového modelu. Princip obalování spočívá v opakovaném namáčení voskového stromečku do keramické kašovité hmoty, sestávající z pojiva a plniva, následným posypáním žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušením. Tento postup zahrnuje nanášení několika vrstev obalové hmoty, obvykle mezi pěti až patnácti, dokud není dosaženo požadované tloušťky obalu pro danou pevnost. Technologii lze rozdělit do několika základních operací.

6.1.1 Příprava a odmaštění voskového modelu

Aby se předešlo výrobním poruchám, jako je odloupení nebo popraskání vysušeného obalu, je velmi důležité ještě před samotným obalováním odstranit z povrchu voskového stromečku zbytky dělicího prostředku. Díky tomuto ošetření dojde k lepšímu přilnutí prvního obalu k voskovým modelům.

6.1.2 Ponoření do obalové hmoty

Skořepina je vyrobena z jednotlivých vrstev pomalým ponořením voskového stromečku do obalové hmoty. Současným otáčením a nakláněním dojde k rovnoměrnému pokrytí modelů a zabránění vzniku vzduchových bublinek v rozích, koutech nebo drážkách. Poté se stromeček vyjme a manipuluje se s ním tak, aby se hmota rovnoměrně rozdělila a přebytečná břečka odkapala. Během obalování se dbá na to, aby jednotlivé vrstvy měly přibližně stejnou tloušťku. První vrstva, přicházející do kontaktu s voskovým modelem, se ponořuje a odkapává kratší dobu než zbylé ostatní, na které se používá hustší obalová hmota a jejich odkapávání trvá delší dobu.

Základní vlastnosti keramických skořepin jsou dány charakterem plniva (žáruvzdorný materiál) a pojiva (vesměs kapalná), spolu tvoří vlastní obalovou hmotu skořepinové formy.

6.1.3 Posyp modelů zrnitým keramickým materiálem

Po vyjmutí z obalové hmoty a odkapání se stromeček posype žáruvzdorným materiálem vhodné zrnitosti. Pro řidší obalové hmoty se používá jemnější žáruvzdorný materiál a pro hustší pak hrubší materiál. Aby byly posypy stejnoměrné, skládá se posypový materiál z rozdílných velikostí zrn, smíchaných v optimálním poměru.

Dříve se žáruvzdorný materiál nanášel sprchovým posypem - posypání obaleného stromečku proudem volně padajícího materiálu. V dnešní době se využívá fluidní posyp - ponoření stromečku do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Na první dva obaly, které rozhodují o kvalitě povrchu odlitku, se používá jemný materiál se zrnitostí většinou 0,1-0,25 mm, na další obaly pak 0,25-0,5 mm.

6.1.4 Sušení nebo chemické vytvrzování modelů

Po obalení keramickou břečkou a posypáním žáruvzdorným materiálem dochází k tuhnutí obalu, to probíhá buď odpařením těkavých látek z obalové hmoty, nebo působením chemického činidla. Sušení probíhá tak, že obaly schnou v klimatizovaném prostoru při teplotě 20-24 °C při vlhkosti 50-70 %. Při chemickém vytvrzování keramických obalů se forma vystaví účinku plynného čpavku a poté se proudem vzduchu čpavkové páry odstraňují. Postup namáčení, posypání a sušení se opakuje až do vytvoření dostatečné tloušťky skořepiny (obr. 30).



Obr. 30 Sušení keramických skořepin [33]

Vlivem rozdílné tepelné roztažnosti voskových směsí a keramiky může voskový model obklopený keramickým obalem způsobit jeho popraskání. Děje se tak při velkém nárůstu okolní teploty během sušení skořepiny. Aby se těmto problémům zabránilo, je v dnešní době většina obaloven opatřena řízenou teplotou, která je monitorována.

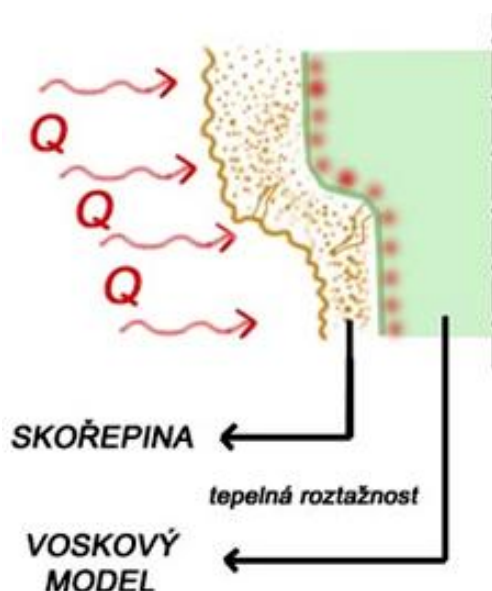
6.2 VYTAVOVÁNÍ VOSKOVÉ HMOTY ZE SKOŘEPIN [1], [10], [21], [22]

Aby bylo možné do skořepinové formy odlévat, je nutné odstranit vytavitelný voskový model, to se provádí po nanesení a dokonalém vysušení posledního obalu skořepiny. Cílem této operace je odstranit všechnen vosk z keramické skořepiny bez jejího poškození v co nejkratší době a za co nejnižších nákladů. Zařízení používaná pro vytavování vosku jsou konstruována tak, aby zachytávala vytavený vosk ze skořepin a tím nedocházelo ke ztrátám v podobě odpadu. Při regeneraci voskové směsi dochází k odstraňování nečistot a přimísení asi 1/5 nového vosku. Po této úpravě se vosk znovu využije pro výrobu voskových modelů.

Díky působení vosku jako detektoru chyb je v této fázi možné odhalit některé vady, jako například praskliny, zvláště při použití tmavších barevných vosků, které při prosáknutí zobrazí vadu jako skvrnu na povrchu formy.

Základním problémem této operace je velká tepelná roztažnost vosků a nízká tepelná roztažnost skořepin. Pro samotné vytavení vosku dostačují teploty pohybující se mezi 60-90 °C, avšak vlivem takto nízkých teplot, rovnoměrného vytavování a vysoké roztažnosti vosku může docházet k popraskání keramických skořepin. Těmto vadám lze předejít vytvořením dilatační spáry na povrchu modelu. To se provádí rychlým ohřevem, tzv. tepelným šokem, kdy se skořepina ohřeje na vyšší teplotu tak, aby se tenká vrstva vosku přiléhající k první obalové vrstvě natavila. Tím se vytvoří dilatační spára (obr. 31), která zachycuje vzniklé deformace vosku a skořepiny a zabraňuje jejímu popraskání.

Cílem této operace je odstranit všechnen vosk z keramické skořepiny bez jejího poškození (obr. 32).



Obr. 31 Dilatační spára [10]



Obr. 32 Skořepina po vytavení vosku [34]

6.2.1 Používané techniky pro vytavování vosku

1) Vytavování za vysoké teploty

Také nazývané jako vyžihání (flash fire) systém. Obalené stromečky se vytavují v peci při teplotách 750-1100 °C a současně dochází k vypálení skořepin. Formy se orientují vtokovým systémem směrem dolů pro snazší vyplavení voskové hmoty a její zachycení. Nevýhodou je částečné znehodnocení voskové směsi a možnost vzniku výbušné atmosféry. Ztráty vosku se pohybují mezi 10-15 % a doba vypalování je 15-25 minut.

2) Vytavování za nízké teploty

Vytavování se provádí v různých lázních, například v roztavené hmotě stejného složení jako, má hmota modelů, po dobu 10-15 minut, v lázni z nízkotavitelných slitin (cín, olovo, antimon, vizmut). Často používanou technologií je vytavování ve vroucí vodě, výhodou je jen minimální vsáknutí roztaveného vosku do skořepiny a také menší nebezpečí jejího popraskání. Vytavení trvá 10-20 minut podle tvaru a složitosti stromečku.

3) Vytavování mikrovlnným ohřevem

Skořepiny, navlhčené vodou, se vkládají do mikrovlnného pole. Vlivem vlhkosti formy dojde k rychlému ohřevu, vytvoření dilatační spáry a umožnění rozpínání modelu. Tato technologie se stále ještě vyvíjí a její velkou výhodou je možnost automatizace.

4) Vytavování horkým vzduchem

Do středu vtokového kůlu voskového stromečku se zavede proud horkého vzduchu. Dříve než se ohřeje voskový model, dojde k protavení vtokového systému a tím k odtavování zevnitř, čímž se zabrání popraskání skořepin.

5) Vytavování v autoklávu [34]

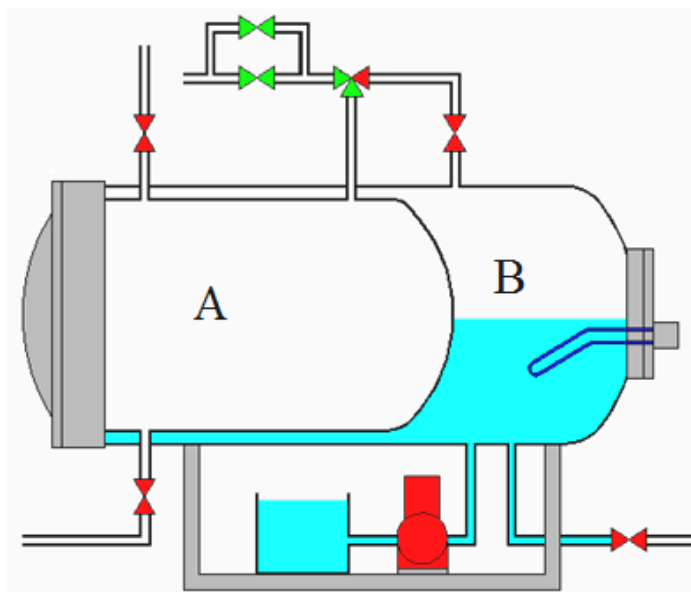
V současné době se řadí mezi nejpoužívanější metody. Vytavování probíhá pomocí syté vodní páry v uzavřených tlakových nádobách. Skořepiny se umísťují tak, aby z nich vosk mohl volně vytékat a lépe se zachycovat pro regeneraci a další použití. Hlavní důvody pro volbu vytavování v autoklávu jsou ideální vlastnosti páry na přenos tepla, snadný sběr vytaveného vosku a vysoká účinnost. V praxi se používají zařízení s nárůstem tlaku za 4-5 sekund na pracovní tlak 6-8 atm s řízenou rychlostí snižování tlaku a při teplotě páry 160-170 °C. Doba vytavování se pohybuje mezi 5-25 minut.

V dnešní době jsou zařízení kontrolována bezpečnostními a kontrolními systémy, například na měření výkonu, rychlosti přetlaku, stroje, těsnosti dveří a mnoha dalších.

Výhody – menší ztráty na modelovém vosku,
– menší množství popraskaných skořepin,
– možnost pracovat s tenčími skořepinami,
– lepší kvalita povrchu odlitků.

Vzhledem k tomu, že nelze vytvořit ideální podmínky při vytavování, bude vždy existovat určité napětí mezi voskovým modelem a keramickou skořepinou. Dosažení lepší pevnosti formy a větší rovnováhy mezi plnivem a pojivem může vést k úspěšnějšímu vytavování

Princip činnosti bojlerklávu: Pára sloužící k vytavování voskové hmoty se tvoří v zadní části autoklávu (B), poté přechází přímo do komory pro vytavování (A), kde jsou umístěny skořepiny. Při poklesu tlaku v komoře B se začne generovat více páry a během 4 sekund obklopí skořepiny v komoře (obr. 33). Výhodou tohoto způsobu odstraňování modelů jsou menší ztráty na modelovém vosku a menší množství popraskaných skořepin.



Obr. 33 Princip činnosti bojlerklávu [35]

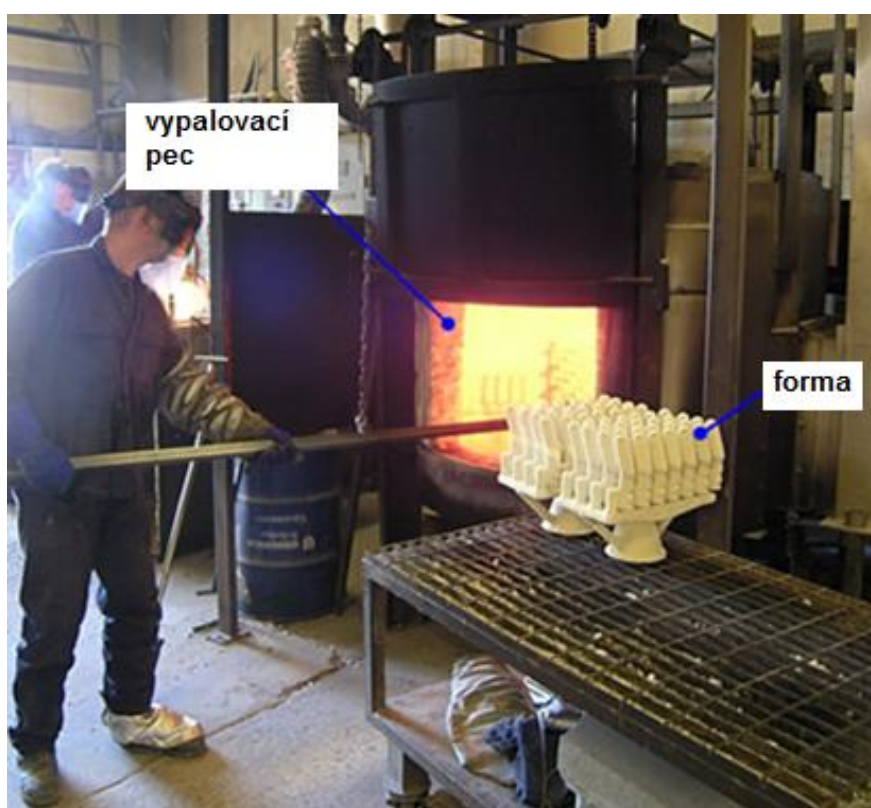
6.3 Žihání keramických skořepin (vypalování) [1], [10],[21]

Před další technologickou operací zvané odlévání je nutno skořepiny vypálit. Žihání slouží k převodu amorfni formy vazné vrstvičky SiO_2 na formu krystalickou za současného odstranění zbylých těkavých látek, jako je vosk.

Pracovní teploty musí dosahovat více jak $800\text{ }^\circ\text{C}$, většinou se pohybují od $900\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$ dle charakteru použitých pecí a vlastností skořepin. Počáteční teploty, při níž vkládáme studené skořepiny do pece (obr. 34), jsou $300\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$, díky tomu skořepiny překonají teplotní náraz a pomalá rychlost ohřevu dovolí postupné prohřívání skořepin bez odlupování jednotlivých vrstev a praskání. Po vyrovnání teplotních rozdílů skořepin se teplota dále zvyšuje. Při teplotě kolem $575\text{ }^\circ\text{C}$ nastávají objemové změny a z tohoto důvodu se na této teplotě setrvává asi 30 minut. Následuje další ohřev až na požadovanou teplotu po dobu 60-80 minut. U skořepin z křemenné moučky je tento postup žihání stejný s rozdílem setrvání 20-30 minut na $100\text{ }^\circ\text{C}$. Pro usměrněné tuhnutí, kde je důležité, aby kov zůstal po určitou dobu v tekutém stavu, se používají teploty okolo $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Některé speciální slitiny požadují teplotu vyšší než $1500\text{ }^\circ\text{C}$, ale při použití keramiky na bázi křemičitanů hrozí při tak vysoké teplotě nebezpečí tavení křemičitanu. Naopak u slitin s nízkým bodem tavení je maximální teplota vypalování $850\text{ }^\circ\text{C}$. Vyžíhaná skořepina je po vizuální kontrole celistvosti připravena k odlévání.

Tři hlavní důvody pro vypalování skořepin před odléváním

- 1) Odstranění zbytkového materiálu:** odstranění nežádoucích látek jako je voda a vosk, zbylých po vytavování. Alkohol je odstraněn při teplotách nižších jak 100 °C a ke kompletnímu odstranění vody zbylé po pojivu a ostatních nečistot dochází při teplotách okolo 1000 °C.
- 2) Zhutnění struktury keramiky:** dosažení požadované pevnosti a tvrdosti keramické formy vzniká převedením amorfní formy vazné vrstvičky SiO₂ na formu krystalickou.
- 3) Předehřátí skořepiny před odléváním:** předehřívání se provádí z důvodu snížení teplotního šoku před odléváním a tím zabránění praskání skořepin.



Obr. 34 Žihání skořepin [36]

6.4 Keramická jádra [21], [22]

Keramická jádra se používají pro dlouhé a úzké otvory, které za pomoci obalovaných jader nelze vyrobit, jelikož dochází k nedokonalému vysušení a to má později za následek rozpadání formy. Mezi další výhody užití keramických jader patří větší přesnost otvorů a povrch dutiny v odlitku je hladší a odolnější proti korozi.

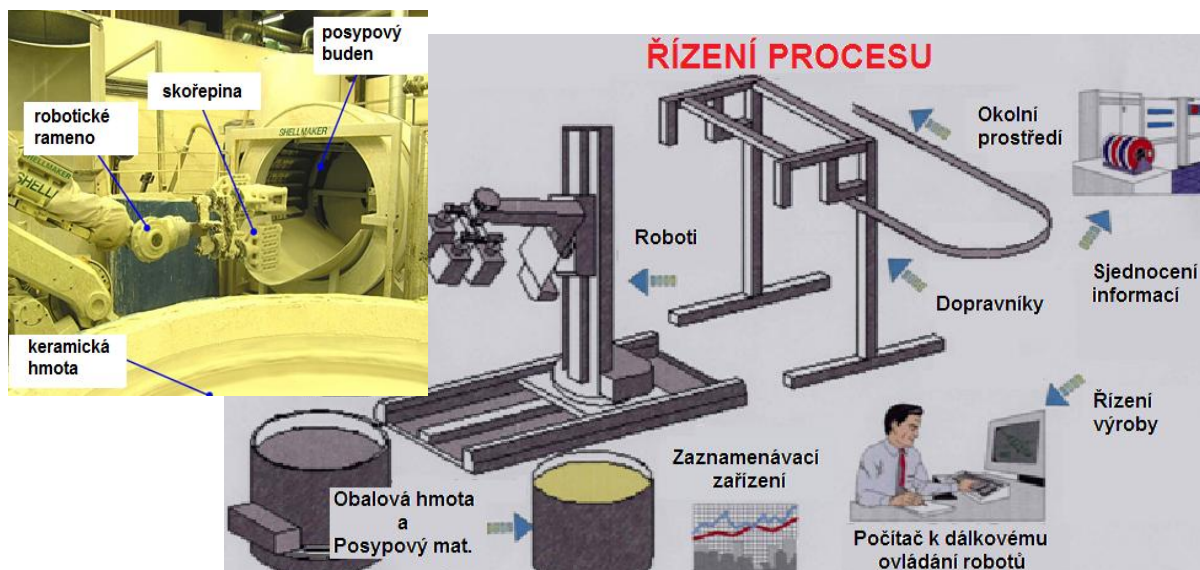
Jádra jsou umisťována do dutiny formy před vstřikováním vosku a stanou se součástí keramické formy. Vyrábějí se vstřikováním keramiky ve formě těsta do dutiny požadovaného tvaru a následuje vypalování za vysoké teploty, při které dojde k zhutnění jádra.

6.5 Nové technologie ve výrobě skořepinových forem

V dnešní době je snaha o co nejefektivnější a neekonomičtější výrobu s použitím automatizovaných pracovišť. Díky zavedení robotů lze snadno zachovat kvalitu a opakovatelnost výroby jednotlivých skořepin a pro pozdější kontrolu zaznamenávat tyto údaje do dokumentace. To vede především k větším přesnostem odlitků a snížení počtu lidských pracovních sil, čímž je pozitivně ovlivněna i cena. Ve slévárnách se začíná přecházet z klasického ručního obalování na automatické robotizované systémy (obr. 35). Postup výroby je takový, že se stromeček uchytí do robotizovaného ramene a za rotace je namáčen a obalován v keramické břečce. Po dostatečném nanesení břečky a jejím rovnoměrným rozprostřením je stromeček přesunut do další komory, kde je posypán žáruvzdorným materiálem. Po vysušení první vrstvy se cyklus opakuje. [37]

Další snahou je co nejvíce snížit dobu výroby skořepin. Výroba jedné skořepiny trvá 2 až 4 dny. Samotná práce, jako je obalování keramickou břečkou a posypání žáruvzdorným materiálem, není tak náročná na čas jako samotné sušení.

To inspirovalo k výrobě skořepiny v průběhu jednoho dne. Jediné zařízení, které je k tomuto postupu potřeba, je sušička s nízkou vlhkostí pro konečné vysoušení. Výsledkem této práce jsou dva druhy skořepin, Fibercoat 229 a skořepina z obalované štukové břečky SAP (obr. 36). Každá z těchto skořepin má své výhody i úskalí a proto je nutné ještě dále vyvíjet a zkoumat chování těchto materiálů. Oba tyto směry vývoje skořepin znamenají výrazné snížení doby výroby. [38]



Obr. 35 Automatizované pracoviště [10], [39]



Obr. 36 Skořepiny vyrobené v průběhu jednoho dne [38]

6.6 Zkoušení keramické břechky [40], [41]

Aby se keramické břechky chovaly podle požadavků (správná stabilita pojiva, udržení celistvosti povlaku a optimální vlastnosti skořepiny), musí se dodržet správné poměry složek. Toho lze dosáhnout pomocí kontrol a sérií testů, které jsou navrženy tak, aby dávaly spolehlivé hodnoty parametrů. Porovnáním těchto hodnot s cílovými a výpočtem správného množství přísad se keramická břecha upravuje. Kontrola se provádí pomocí nejrůznějších typů testů:

- pH,
- procentuální obsah oxidu křemičitého,
- procentuální obsah pevných polymerových látek,
- procentuální obsah pevných látek v pojivu,
- procentuální pevnost skořepiny,
- měrná hmotnost,
- viskozita,
- 24 - hodinový test gelace,
- bakterie,
- destičková zkouška,
- prodyšnost,
- pevnost - za syrova,
 - za tepla,
 - po odlití.

6.6.1 Proces kontroly a testování

1) Kontrola pH

Důvod testování - oxid křemičitý jsou záporně nabitě částice s pH kolem 10. Při přidání moučky pH klesne. Pod 9 pH začíná oxid křemičitý krystalizovat, což je nežádoucí.

Důsledek - nižší životnost břechky,

- horší vytavování,
- slabý keramický obal.

Doporučení - zbránění oxidu uhličitého obsaženého v atmosféře rozpuštění v keramické břechce,

- udržet pH nad 9,4,
- použití amoniaku nebo ostatních dokončovacích příměsí.

Měření - pomocí pH-metru.



Obr. 37 Kontrola pH [41]

2) Procentuální obsah oxidu křemičitého

Důvod testování - zrna oxidu křemičitého poskytují vázání základního materiálu skořepiny.

Důsledek - nízké nebo vysoké hladiny oxidu křemičitého mohou skořepiny oslabit,
- vysoká hladina může způsobit destabilizaci břečky.

Doporučení - pozorně sledovat SiO_2 pomocí rutinních testů,
- úprava dle potřeby pomocí pojiva nebo vody.

Měření - měření procenta oxidu křemičitého v břečce se provádí pomocí odměrné baňky a přesného vážení.



Obr. 38 Kontrola obsahu oxidu křemičitého [41]

3) Procentuální obsah pevných polymerových látek

Důvod testování - polymer působí s křemenem jako pojivo keramické skořepiny,
- zlepšuje některé vlastnosti.

Důsledek - polymery mohou poskytovat počáteční pevnost směsi,
- klesá doba výroby,
- zlepšení keramické břečky,
- podpora přilnavosti.

Doporučení - pozorně sledovat limity pevných polymerových látek při testování,
- dle potřeby upravit pomocí polymeru nebo vody.

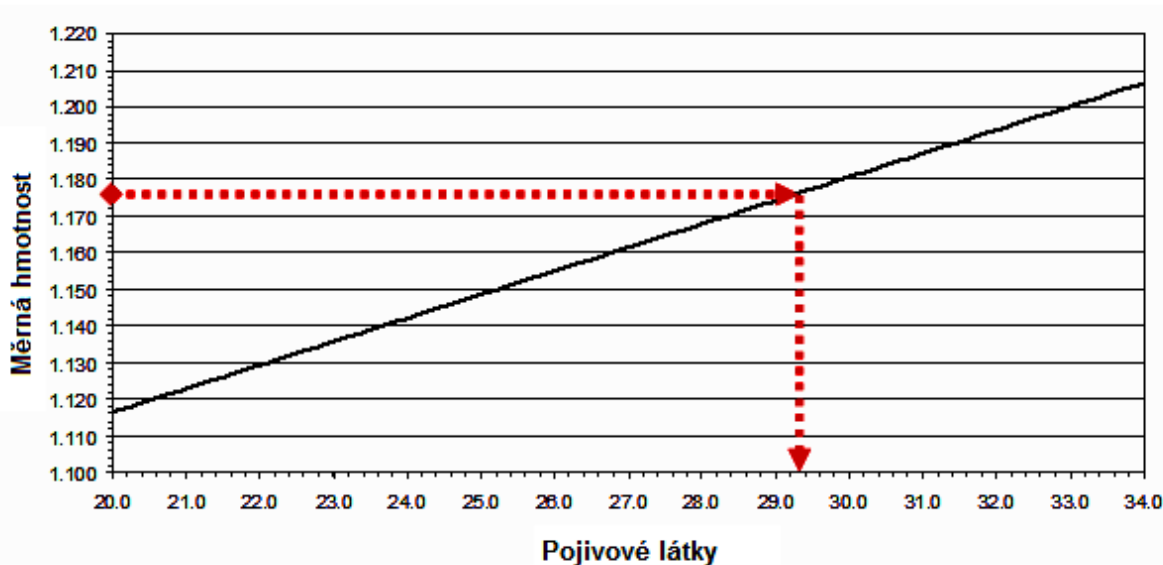
Měření - test se provádí pomocí bilance vlhkosti.



Obr. 39 Kontrola obsahu polymerových látek [41]

Postup kontroly pevných látek v pojivu

- a) Oddělení pojiva od žáruvzdorného materiálu:
 - odstředivka,
 - pomocí měrné hmotnosti - vysoká štíhlá baňka.
- b) Určení množství nežádoucích látek.
- c) Užití grafu pojivových látek závislých na měrné hmotnosti poskytnutého dodavatelem.
- d) Přizpůsobení vodou adekvátně k přísadám.



Graf 2 Graf pevných látek v pojivu závislých na měrné hmotnosti [40]

4) Měrná hmotnost

Důvod testování - určuje viskozitu břechky a tloušťku obalované vrstvy,
- poměr hustoty materiálu ve srovnání s vodou.

Důsledek - velký výkyv v hustotě může znamenat nevyváženost struktury břechky.

Doporučení - pozorně sledovat hustotu při běžném testování.

Měření - sledování měrné hmotnosti břechky pomocí hustoměru a vážení.



Obr. 40 Kontrola měrné hmotnosti [41]

5) Viskozita

Důvod testování - základní test uvádí celkovou bilanci břechky.

Důsledek - zapříčiňuje rovnoměrnou tloušťku povlaku,

- propojení mezi vrstvami.

Doporučení - sledovat a kontrolovat viskozitu, jestli vyhovuje danému rozmezí,

- dle potřeby upravit pomocí vody, pojiva nebo moučky.

Měření - kontrola viskozity pomocí Zahnova/Fordova pohárku,

- měření průtoku/povlakové vlastnosti břechky.



Obr. 41 Kontrola viskozity [41]

Postup kontroly viskozity

- Změření doby odtoku břechky z poháru.
- Měření času od počátku toku do „konečného bodu“. Konečný bod je zastavení proudu toku pomocí prstu, nebo po úplném vypuštění pohárku skrz díru ve dně.



Obr. 42 Zahnův/Fordův pohárek [40]

6) 24 - hodinový test gelace

Spočívá ve vizuální kontrole vzorku po 24 - hodinovém testu.



Obr. 43 Test gelace [41]

7) Bakterie

Důvod testování - způsobují pokles pH,
- zkracují životnost keramické břechky,
- mohou oslabit skořepinu.

Doporučení - ve vážných případech je lze identifikovat pomocí silného zápachu.

Měření - kontrola pomocí bělidel.

8) Destičková zkouška

Důvod testování - primární ukazatel povrchového krytí a přilnavosti.

Důsledek - značí optimální tloušťku vrstvy,
- nízká hmotnost plátku může značit problémy s vypalováním.

Měření - pomocí přístroje pro měření váhy testované destičky.



Obr. 44 Destičková zkouška [41]

9) Prodyšnost

Důsledek - může přispět při odlévání.

Doporučení - prodyšnost může být ovlivněna prostřednictvím změn v žáruvzdorných typech materiálů a velikosti částic.



Obr. 45 Příprava testu prodyšnosti [41]

10) Pevnost

Pevnost za syrova - schopnost odolat bez porušení manipulaci se stromečkem a vytavování.

Pevnost za tepla - schopnost soudnosti při odlévání.

Pevnost po odlití - označuje, jak snadno se dá skořepina po odlití odstranit.



Obr. 46 Testování pevnosti [41]

Běžně se provádí jen ty nejdůležitější testy, jako jsou:

- viskozita pomocí Zahnova/Fordova pohárku,
- procento oxidu křemičitého pomocí odměrné baňky a přesného vážení,
- pH pomocí pH metru,
- kontrola stability.

Ostatní testy jsou doplňující a provádějí se pouze při zvláštních požadavcích.

7. ODLÉVÁNÍ [1], [10], [21], [22]

Metodou vytavitelného modelu lze odlévat nejrůznější součásti za použití široké škály slitin. Z tohoto důvodu patří tavení a odlévání k nejdůležitějším operacím této technologie. Ve většině sléváren se k tavení kovu používá elektrických indukčních pecí, jádrových či bezjádrových nebo vakuových pecí. Odlévá se ihned po vyjmutí žhavých skořepin z vypalovací pece (žíhací). Zmenší se tím teplotní šok při lití, omezí vnitřní pnutí ve skořepinách a sníží nebezpečí praskání.

V dnešní době je používáno několik způsobů odlévání. Odlévání se provádí na vzduchu (otevřené lití) nebo ve vakuu (vakuové lití). Teplota keramických forem se pohybuje mezi 700-800 °C nebo na teplotě okolí, kde však hrozí praskání skořepin.



Obr. 47 Odlévání do forem [42]

7.1 Klasické lití

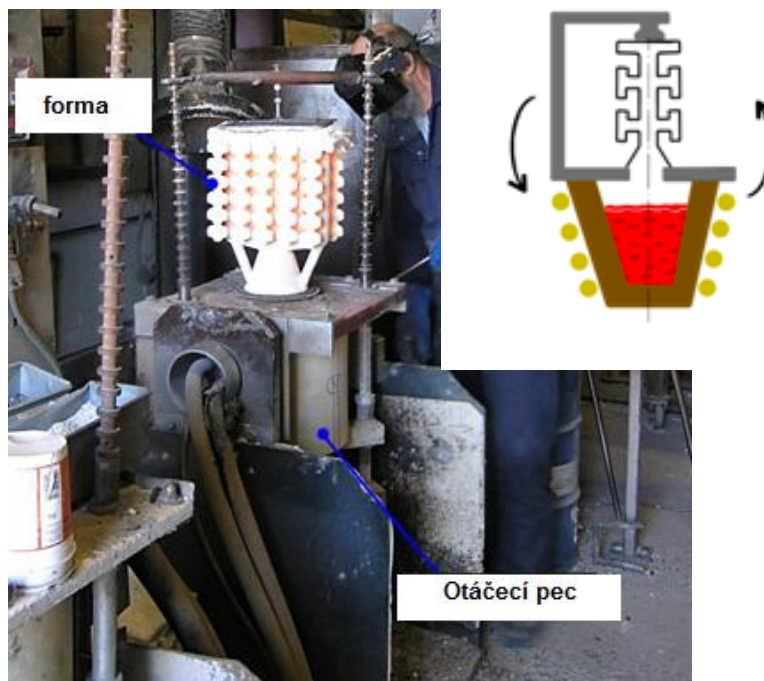
Skořepina je umístěna na licí pole a do takto připravené skořepiny se nalévá roztavený kov, pro jehož zatečení je využita vlastní síla, kterou kov vyvine ve formě.



Obr. 48 Klasické lití [10], [43]

7.2 Sklopné lití

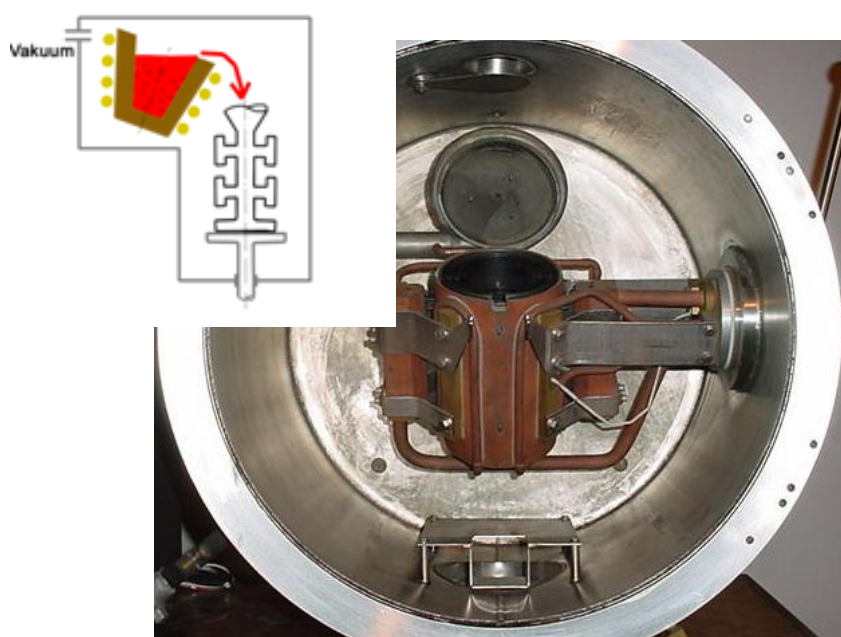
Skořepinová forma je připojena k tavicí peci. Odlévání probíhá nakloněním pece a vyplnění formy kovem.



Obr. 49 Sklopné lití [10], [44]

7.3 Tavení a gravitační lití ve vakuu

Pec a forma připravená k odlití je umístěna do vakuové komory, kde se kov nataví a za postupného uvolnění podtlaku se odlévá.

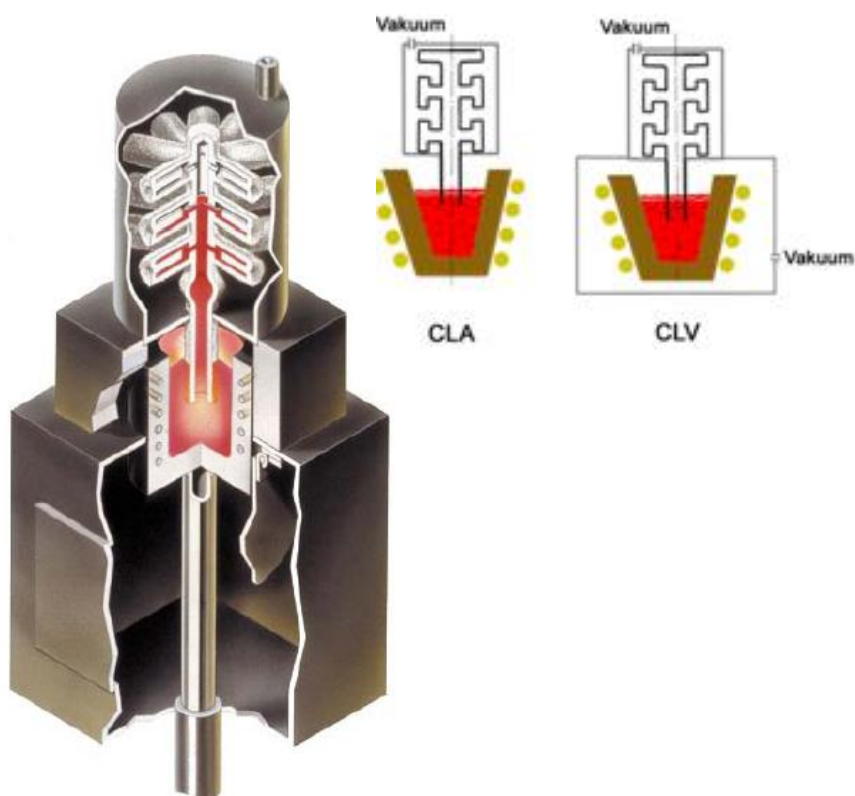


Obr. 50 Gravitační lití ve vakuu [10], [45]

7.4 Vakuové nasávání (CLA, CLV)

Metody CLA a CLV jsou v podstatě stejné, s tím rozdílem, že u metody CLV se kov taví pod vakuem a u CLA ne. Skořepina je umístěna nad kelímek s roztaveným kovem, který se pomocí podtlaku do skořepiny nasaje.

S použitím technologií vakuového lití je možné odlévat i vysoce reaktivní kovy jako je například hořčík, a je možno zabránit oxidaci roztaveného kovu a dalším reakcím.



Obr. 51 Vakuové nasávání [10], [46]

8. DOKONČUJÍCÍ OPERACE [1], [10]

Pořadí dokončujících operací navazuje v následujícím pořadí:

- hrubé odstranění převážné části keramické skořepiny, obvykle mechanicky (vytloukání),
- odstranění odlitků od vtokového systému,
- odstranění zbylé keramiky,
- dokončující operace (odstranění vtoků z odlitků, broušení, dokončování),
- kontrola jakosti odlitků.

8.1 Hrubé odstranění keramické skořepiny [21], [22]

Po ztuhnutí a zchladnutí kovu je třeba odstranit keramickou skořepinu. Tato operace je poněkud obtížná, protože skořepina bývá velmi tvrdá. Keramika se odstraňuje mechanickým oklepáváním. Jedním ze způsobů je vibrační oklepávání na pneumatických kladivech. Kvůli prašnosti a hlučnosti se odlitek uzavře do vzduchotěsné a prachotěsné komory, kde se nachází vibrační stroj. Díky úderům kladiva skořepina začne praskat a velké kusy odpadnou.

Nově používanou metodou je odstranění keramiky pomocí vykotlaného vodního paprsku směřovaného na povrch skořepiny.



Obr. 52 Hrubé odstranění keramiky [34]

8.2 Oddělení odlitků od vtokového systému [21], [22]

Další operací je oddělení odlitků od vtokové soustavy, z důvodu nevýhodného a neekonomického opracovávání odlitků i s vtokovými systémy. Odlitky můžeme oddělovat kotoučovými nebo třecími pilami. Hliníkové odlitky jsou převážně oddělovány pilami pásovými.



Obr. 53 Odřezávání odlitků od vtokového systému [47]

8.3 Odstranění zbylé keramiky [21], [22]

Po odřezání vtokového systému je nutno odstranit zbylou keramickou skořepinu, která zůstává v rozích a ve špatně přístupných místech, jako jsou například dutiny.

Existují dva základní způsoby odstranění skořepiny, pomocí abrazivní a chemické metody. Chemické odstraňování skořepiny je sice velmi snadné a čisté, ale z důvodu velké finanční náročnosti se používá jen výjimečně. Proto se převážně využívá pro těžko odstranitelné skořepiny a pro obtížně přístupná jádra.

8.3.1 Abrazivní metody

Tyto metody lze rozdělit na tlakové tryskání a tryskání bez použití vzduchu.

1) Tlakové tryskání

Jako médium se používá vzduch nebo voda, která vrhá abrazivo na pracovní povrch. Tryskání vodním zdrojem se dělí na otevřené tryskání a uzavřené, které používá vysokotlaký vodní paprsek

2) Tryskání bez použití vzduchu

Z názvu vyplývá, že stroje nepoužívají stlačený vzduch, ale abrazivní částice (ocelové broky) vhájí na odlitky pomocí lopatkového kola.



Obr. 54 Abrazivní metody odstraňování keramiky [48]

8.3.2 Chemické metody

Pomocí chemické lázně, do které se odlitky ponořují, dochází k odstranění zbylé keramické skořepiny. Dle druhu žíraviny rozlišujeme lázeň s rozpuštěnou solí a horkou vodní žíravou lázeň.

1) Lázeň s rozpuštěnou solí

Skládá se z rozpuštěného hydroxidu sodného a dalších aditiv. Doba setrvání odlitků v solné lázni je alespoň 20 min, poté jsou odlitky vytaženy, důkladně opláchnuty od zbytku solného roztoku a ponořeny do neutralizační kyseliny.

2) Horká vodní žíravá lázeň

Tyto lázně používají hydroxid sodný při teplotě 80 °C. Pro dokonalé odstranění keramiky jsou odlitky namočený několik hodin, opláchnuty horkou vodou a sušeny.

8.4 Dokončující operace [21], [22]

Mezi dokončující operace se řadí odstraňování vtoků z odlitků, zbavování povrchových vad a skvrn, broušení a leštění. Používá se široká škála brousících zařízení, například horizontální, vertikální, zapichovací, s výkyvným ramenem či ruční brusky.

V některých případech dokončování obsahuje další operace, například tepelné zpracování nebo obrábění.

8.5 Kontrola jakosti odlitků [21], [22]

Metodou vytavitelného modelu lze vyrobit velmi přesné součásti, které pracují v extrémních podmínkách, proto důsledné dodržování rozměrů a jejich kontrola je nevyhnutelným požadavkem.

Všeobecná kontrola odlitků zahrnuje kontrolu tvaru a rozměrů, která se provádí vizuálně. Dále se u odlitků kontroluje chemické složení, struktura, vnitřní jakost, mechanické vlastnosti pomocí chemické analýzy, mechanické zkoušky a mnoho dalších.

V dnešní době je kladen stále větší důraz na zdravotnost odlitku a jeho rozměrovou přesnost, proto i metody zkoušení se musí stále zdokonalovat.



Obr. 55 Kontrola odlitku [49]

ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo vypracovat literární rešerši na téma technologie vytavitelného modelu v současnosti. Zaměřuje se především na nejmodernější zařízení a suroviny od výroby voskového modelu a zkoušení voskových směsí, přes výrobu keramických skořepin a zkoušení obalových hmot, vytavování vosků ze skořepin, odlévání až po dokončující operace.

Metoda odlévání pomocí vytavitelného modelu se za celou dobu, kdy byla vyvíjena, stala jedním z nejprogressivnějších způsobů lití. V dnešní době je možno vyrábět velice přesné odlitky za použití široké škály slitin bez nutnosti dalšího dokončování. Využití této technologie nalézá především v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, zdravotnictví, energetice a mnoha dalších odvětvích. Před světovou krizí docházelo každoročně k nárůstu výroby odlitků až o 10%, ale v letech 2008-2009 v době celosvětové krize byl nárůst brzděn. Avšak díky konkurenceschopnosti vůči jiným technologiím, začíná znovu docházet k nárůstu výroby jako dříve.

Z literatury je zřejmé, že i po tak dlouhé době vyvíjení a modernizování jednotlivých etap přesného lití je ještě mnohé co zdokonalovat. Pokud tato technologie má patřit mezi světové progresivní metody je nutné jít s moderní dobou a dbát o co nejekonomičtější a nejekologičtější používání materiálů a strojních zařízení za velice příznivých finančních a časových podmínek výroby konečného odlitku. V dnešní době je potřeba mít celý proces pod kontrolou ve všech fázích technologie, a proto je snaha o automatizování celé výroby nebo jednotlivých etap. Díky zavedení robotů je snadné zachovat stejnou kvalitu a opakovatelnost výroby. V některých případech, jak je tomu například u výroby odlitků pro letecký průmysl, se uchovává dokumentace o procesu výroby a v případě havárie je možné chybu zpětně dohledat a v budoucnu se jí vyvarovat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BEELEY, P. R.; SMART, R. F. *Investment Casting*. 1 st ed. Cambridge, UK: The University Press, 1995. 486 s. ISBN 0-901716-66-9.
- [2] HORÁČEK, Milan. *Technologie vytavitelného modelu: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>>.
- [3] PAVELKA, Miroslav. Užité vlastnosti lití vytavitelným modelem. *Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl*. Říjen 2001, XLIX, 10, s. 581-584. ISSN 0037-6825.
- [4] HORÁČEK, Milan. Přehled světové výroby odlitků metodou vytavitelného modelu. *Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl*. Říjen 2001, XLIX, 10, s. 564-570. ISSN 0037-6825.
- [5] WILLIAMS, Ron; HORÁČEK, Milan; HIRST, Richard. Přehled světové výroby odlitků litých na vytavitelný model. *Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl*. Leden 2005, LIII, 1, s. 4-6. ISSN 0037-6825.
- [6] WILLIAMS, Ronald; HIRST, Richard. *Investment Casting Wax: Review of World Investment Casting Markets* [online]. 2010-05-17 [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/ml32.pdf>>.
- [7] HORÁČEK, Milan; CILEČEK, Jarmil. Capabilities of Investment Casting Technology. *Livarski Vestnik*. 2006, 4, s. 175-186. ISSN 0024-5135.
- [8] HORÁČEK, Milan. Současná světová produkce odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. In *Bulletin*. Brno: Sdružení přesného lití, 1999. s. 1-3. ISBN 80-238-4209-0.
- [9] OLEFINES, Blayson. *Investment Casting Wax: The Lost Wax Proces* [online]. 2008 [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/process2010.pdf>>.
- [10] HORÁČEK, Milan. *Výroba přesných odlitků: Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2011-04-26]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>>.
- [11] *Kompass*. [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. ČZ a.s. Dostupné z WWW: <http://cz.kompass.com/profile_CZ009866_cs/%C4%8Dz-a.s.-ps.html>.
- [12] MADAJ, Martin, et al. Nové přístupy k vývoji umělých kloubních náhrad. *Průmyslové spektrum* [online]. 2010, 10, [cit. 2011-04-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-pristupy-k-vyvoji-umelych-kloubnich-nahrad>>.
- [13] *Beznoska*. [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Beznoska s.r.o. Dostupné z WWW: <<http://www.beznoska.cz/co-nabizime/kolena/revizni-totalni-nahrada-kolenniho-kloubu-typ-svr.html>>.

- [14] *Nemocnice* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Endoprotézy. Dostupné z WWW: <<http://www.nemcb.cz/cz/page/76/Endoprotezy.html?detail=395>>.
- [15] *První brněnská strojírna* [online]. 2000, 2011 [cit. 2011-04-30]. Výrobní program. Dostupné z WWW: <http://www.pbsvb.cz/dme_vyrobní_program.php?vaha=10,>.
- [16] *KDYNIMUM* [online]. 2006 [cit. 2011-04-30]. Výrobky. Dostupné z WWW: <<http://www.kdynium.cz/cesky.asp?pid=p3>>.
- [17] *Sport-core.cz* [online]. 2009, 2011 [cit. 2011-04-30]. Golf. Dostupné z WWW: <<http://www.sport-core.cz/sportovni-potreby/golf/hole-hul-driver-putter-wedge-zelezo-hybrid-drevo/138-golfova-hul-bridgestone-iron-j36-combo.html>>.
- [18] HORÁČEK, Milan. Technologie vytavitelného modelu-technologie pro nové tisíciletí. *Slévárství: Časopis pro slévárský průmysl*. Říjen 2001, XLIX, 10, s. 570-580. ISSN 0037-6825.
- [19] *Ningbo Tiancheng Non-Ferrous Metal product CO.,LTD.* [online]. 2010 [cit. 2011-04-30]. Investment Casting Process. Dostupné z WWW: <<http://www.cheng-casting.com/Investment.htm>>.
- [20] *Vertex Engi-Mech Pvt.Ltd* [online]. 2009, 2010 [cit. 2011-04-30]. Casting Process. Dostupné z WWW: <<http://www.vertexengimech.in/casting-process.htm>>.
- [21] DOŠKÁŘ, Josef, et al. *Výroba přesných odlitků*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976. 313 s. DT 621.746.
- [22] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. Praha: České vysoké učení technické, 2009. 30 s. Dizertační práce. ČVUT. Dostupné z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
- [23] *MCAE: 3D Digitální technologie* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Vakuové lití. Dostupné z WWW: <<http://www.mcae.cz/vakuove-liti>>.
- [24] *Slévárství* [online]. 2000 [cit. 2011-04-26]. Články. Dostupné z WWW: <<http://www.slevarenstvi.cz/text/Obr4.jpg>>.
- [25] *Industrial Metal Casting* [online]. 2009 [cit. 2011-04-30]. Casting Processes. Dostupné z WWW: < <http://www.industrialmetalcasting.com/investment-casting.html> >.
- [26] HORÁČEK, Milan. *Přehled vosků pro přesné lití*. Brno: Odbor slévárství ÚST, FSI Brno, 2006. 15 s.
- [27] *Investment Casting Wax* [online]. 2010 [cit. 2011-04-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/>>.
- [28] HIRST, Richard; OLEFINES, Blayson. *Composition, Control and Use of Investment Casting Wax* [online]. 2007. [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl14.pdf>>.
- [29] *nvestcast* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Wax Pattern Production. Dostupné z WWW: <<http://www.investacast.com/Portals/0/images/patternMixer.jpg>>.

- [30] *Investcast* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Wax Pattern Production. Dostupné z WWW: <<http://www.investacast.com/Portals/0/images/waxPatternTreeLge.jpg>>.
- [31] HANCOCK, Phil. *Wax Fundamentals and Use with Ceramic Cores* [online]. 2007 [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl15.pdf>>.
- [32] BOND, David; NISHIKAWA, Koji. *Investment Casting Wax: Technology* [online]. 2002. [cit. 2011-04-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>>.
- [33] *Prototyping Rapid.com* [online]. 2008 [cit. 2011-04-30]. Investment Casting. Dostupné z WWW: <<http://www.prototypingrapid.com/page/1042353>>.
- [34] SOUKUPOVÁ, Lucie. *Výroba odlitků metodou vytavitelných modelů*. Zlín, 2008. 29 s. Absolventská práce. SPŠ Zlín.
- [35] PICKARD, Howard. *Mould dewaxing: Seminar*, Brno. 2007. 20 s.
- [36] *Investcast* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Wax Pattern Production. Dostupné z WWW: <<http://www.investacast.com/Portals/0/images/oven.jpg>>.
- [37] *Investcast* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Wax Pattern Production. Dostupné z WWW: <http://www.investacast.com/ceramic_shell_making.aspx>.
- [38] Studie zkoumá možnosti nových alternativních skořepin vyrobených během jedné směny. *Slévárství: Časopis pro slévárenský průmysl*. 2008, LVI, 9-10, s. 431-432. ISSN 0037-6825.
- [39] *Investcast* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Wax Pattern Production. Dostupné z WWW: <<http://www.investacast.com/Portals/0/images/stuccoing.jpg>>.
- [40] HENDRICKS, Mike; BIJVOET, Mark. *Ceramic Shell Preparation and Control*. Cairo: International Seminar, 2007. 47 s.
- [41] BEDDOW, Jarrad. *Introduction to the Investment Casting Process*. REMET, 2007. 86 s.
- [42] *Česká Zbrojovka* [online]. 2009, 2011 [cit. 2011-04-30]. Slévárna přesného lití. Dostupné z WWW: <<http://www.czub.cz/cz/catalog/300-nezbrojni-produkce/NP-OST/CZ-ostatni-produkce-slevarna-presneho-liti.aspx>>.
- [43] *Slévárna přesného lití* [online]. 2009 [cit. 2011-04-30]. Výroba. Dostupné z WWW: <<http://www.splslevarna.cz/cze/czevyroba.htm>>.
- [44] *Investcast* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Wax Pattern Production. Dostupné z WWW: <http://www.investacast.com/metal_casting.aspx>.
- [45] *E. McGrath* [online]. 2011 [cit. 2011-04-30]. Vacuum and Atmosphere furnaces. Dostupné z WWW: <<http://www.emcgrath.com/catalog/images/FRO/FRO560-2.jpg>>.
- [46] *Daido Steel* [online]. 2010 [cit. 2011-04-30]. Investment Casting Products. Dostupné z WWW: <http://dsuxgwns.aido.co.jp/english/products/casting/casting_systems.html>.

- [47] *KDYNIUM* [online]. 2006 [cit. 2011-04-30]. Výroba. Dostupné z WWW: <<http://www.kdynium.cz/cesky.asp?pid=p2d6>>.
- [48] *Konrad Rump* [online]. 2009 [cit. 2011-04-30]. Výrobky. Dostupné z WWW: <<http://www.rump-oft.de/96-V%FDrobky/100-Bubnov%E1-tryskac%ED-za345%3B%EDzen%ED.html>>.
- [49] *Ortmann* [online]. 2008 [cit. 2011-04-30]. Slévárna. Dostupné z WWW: <<http://www.ortmann.cz/cs/page.php?lang=cs&page=slevarna>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>Označení</i>	<i>Legenda</i>
DSC	Diferenciální skenovací kalorimetrie (Differential scanning calorimetry)
C.P.	Bod tuhnutí
CLA	Vakuové nasávání s tavením kovu na vzduchu (Counter-gravity & Low-pressure casting in Air)
CLV	Vakuové nasávání s tavením kovu ve vakuu (Counter-gravity & Low-pressure casting in Vakuum)

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Hlava Ramsese II.
1292–1225 let před naším letopočtem [1]
- Obr. 2 Tryskový motor [9]
- Obr. 3 Lopatka leteckého motoru - rovnoosá struktura,
usměrněná krystalizace, monokrystal [10]
- Obr. 4 Odlitky pro automobilový průmysl [11]
- Obr. 5 Kloubní náhrady - kyčelní, kolenní [12], [13], [14]
- Obr. 6 Odlitky pro energetiku [9], [15]
- Obr. 7 Přesně lité odlitky pro zbrojní průmysl [16]
- Obr. 8 Golfové hole [17]
- Obr. 9 Princip technologie vytavitelného modelu [19], [20]
- Obr. 10 Výroba formy zalitím matečného modelu do sádry [10]
- Obr. 11 Forma z nízkotavitelné slitiny [10]
- Obr. 12 Forma ze silikonového kaučuku [23]
- Obr. 13 Výroba formy metalizací [10]
- Obr. 14 Výroba formy pomocí galvanoplastiky [10]
- Obr. 15 Forma vyrobená obráběním [24]
- Obr. 16 Princip vstřikování vosku do formy [10], [19], [25]
- Obr. 17 Vstřikovací stroj [10]
- Obr. 18 Voskové směsi [9]
- Obr. 19 Regenerace voskové směsi [10]
- Obr. 20 Schéma regenerace voskové směsi [26]
- Obr. 21 Schéma rekonstituce voskové směsi [26]
- Obr. 22 Sestava jednoho modelu [29]
- Obr. 23 Sestava modelů do stromečku [30]
- Obr. 24 Modely sestavené horizontálně [10]
- Obr. 25 Modely připojeny na vtokový kanál [10]
- Obr. 26 Kontrola voskové směsi - bod tuhnutí [32]
- Obr. 27 Kontrola voskové směsi - bod tavení [32]
- Obr. 28 Kontrola voskové směsi - viskozita [32]
- Obr. 29 Zkušební forma „zabíravosti“ [28]
- Obr. 30 Sušení keramických skořepin [33]
- Obr. 31 Dilatační spára [10]
- Obr. 32 Skořepina po vytavení vosku [34]

- Obr. 33 Princip činnosti bojlerklávu [35]
Obr. 34 Žíhání skořepin [36]
Obr. 35 Automatizované pracoviště [10], [39]
Obr. 36 Skořepiny vyrobené v průběhu jednoho dne [38]
Obr. 37 Kontrola pH [41]
Obr. 38 Kontrola obsahu oxidu křemičitého [41]
Obr. 39 Kontrola obsahu polymerových látek [41]
Obr. 40 Kontrola měrné hmotnosti [41]
Obr. 41 Kontrola viskozity [41]
Obr. 42 Zahnův/Fordův pohárek [40]
Obr. 43 Test gelace [41]
Obr. 44 Destičková zkouška [41]
Obr. 45 Příprava testu prodyšnosti [41]
Obr. 46 Testování pevnosti [41]
Obr. 47 Odlévání do forem [42]
Obr. 48 Klasické lití [10], [43]
Obr. 49 Sklopné lití [10], [44]
Obr. 50 Gravitační lití ve vakuu [10], [45]
Obr. 51 Vakuové nasávání [10], [46]
Obr. 52 Hrubé odstranění keramiky [33]
Obr. 53 Odřezávání odlitků od vtokového systému [47]
Obr. 54 Abrazivní metody odstraňování keramiky [48]
Obr. 55 Kontrola odlitku [49]

SEZNAM GRAFŮ

- Graf 1 Objemy prodeje odlitků ve světě [6]
Graf 2 Graf pevných látek v pojivu závislých na měrné hmotnosti [40]