

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce byla vypracovaná v rámci prezenčního studia oboru B-STI Strojní inženýrství a zpracovává postupy a metody výroby odlitků při použití technologie odlévání na vytavitelný model. Tato literární rešerše se zabývá celým postupem výroby odlitku od výroby formy na modely, až po konečnou kontrolu vyrobené součásti a je strukturována přesně podle technologického postupu při výrobě součásti. U každé části technologického postupu jsou uvedeny běžně užívané postupy i nové technologie, které se rozvíjí a jsou v dnešní době zkoumány. V druhé části práce jsou uvedeny konkrétní příklady použití technologie vytavitelného modelu v současné době. Cílem této práce je vytvořit literární rešerši, popisující vývoj technologie vytavitelného modelu a její možnosti využití v dnešní době.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Technologie odlévání, technologie vytavitelného modelu, přesné lití, kontrola odlitku

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis elaborated within the scope of full-time study of specialization B-STI Mechanical Engineering is dealing with procedures and methods of production castings using the lost wax casting technology. This literature review deals with the entire production process from casting molds for the production models to the ultimate control of manufactured parts and is structured exactly as the technological process in the manufacture of components. For each of the technological process are given commonly used procedures and new technologies that are developed and are now examined. The second part is specific examples of the use of technology investment pattern at present. The aim of this work is to create a bibliographic search, describing the evolution of technology, investment pattern and its possible use today.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Casting technology, lost pattern technology, investment casting, casting inspection

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MAZŮREK, T. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

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

V ..... dne 28.5.2010

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

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

## Obsah

Zadání

Abstrakt

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1.	ÚVOD .....	7
2.	HISTORIE .....	7
3.	VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU .....	8
3.1.	Výroba formy na modely .....	8
3.2.	Zhotovení voskového modelu .....	10
3.2.1.	Používané voskové směsi .....	13
3.2.2.	Technologie odstříku .....	13
3.3.	Sestavování voskových modelů .....	14
4.	VÝROBA KERAMICKÉ SKOŘEPINOVÉ FORMY .....	15
4.1.	Obalování .....	15
4.1.1.	Nové metody obalování .....	16
4.1.2.	Břečky v současnosti .....	17
4.1.3.	Posypové směsi v současnosti .....	17
4.2.	Vytavování .....	18
4.3.	Žihání skořepiny .....	20
5.	ODLÉVÁNÍ .....	22
5.1.	Klasické lití .....	22
5.2.	Sklopné lití .....	22
5.3.	Tavení a gravitační lití ve vakuu .....	23
5.4.	Vakuové nasávání (metody CLA/CLV) .....	23
6.	DOKONČOVACÍ OPERACE .....	24
6.1.	Oddělení hrubších částí skořepiny od odlitku .....	24
6.2.	Oddělování odlitků od vtokových soustav .....	25
6.3.	Dočištění odlitků od zbytků skořepiny .....	26
6.3.1.	Abrazivní metody .....	26
6.3.2.	Chemické metody .....	27
6.4.	Broušení odlitků .....	27
6.5.	Tepelné zpracování .....	28
7.	KONTROLA JAKOSTI ODLITKŮ .....	31
7.1.	Destruktivní zkoušení .....	31
7.1.1.	Struktura a chemické složení .....	31

7.1.2. Mechanické vlastnosti.....	32
7.2. Nedestruktivní zkoušení .....	32
7.2.1. Vnitřní jakost odlitků.....	32
7.2.2. Vnější jakost odlitků .....	34
8. MOŽNOSTI APLIKACE VYTAVITELNÉHO MODELU .....	36
9. ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	40
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	44

# 1. ÚVOD

Metoda vytavitelného modelu, nebo jak je jindy nazývána – metody „lost wax“ spadá v širším dělení slévárenství pod metody přesného lití. Při výrobě součástí touto metodou je dosaženo velkých přesností, v řádech až 0,01mm, z tohoto důvodu tento způsob odlévání spadá do kategorie „near net shape“ – odlitky s rozměry a přesností velmi blízké hotovým výrobkům. Právě z těchto důvodů je tato metoda jednou z nejvyužívanějších slévárenských metod vůbec – velká úspora nákladů na materiál a následném opracovávání obráběním. Je uváděno, že metoda vytavitelného modelu přináší konstruktérům největší množství různých variant výroby součástí, jak z důvodu její variability, tak z důvodu nepřeborného množství materiálů, které je možné v dnešní době odlévat.

V dnešní době jsou kladeny čím dál větší nároky na rozměrovou přesnost, kvalitu odlitků a samozřejmě co nejmenší cenu. Z toho důvodu jsou vyvíjeny další nové technologie, o kterých se budu dále v práci zmiňovat.

## 2. HISTORIE [1],[2]

Z dochovaných uměleckých děl ze starého Egypta, Persie, Palestiny, Číny a např. aztéckého Mexika víme, že metoda vytavitelného modelu je známa již několik tisíciletí. Sice v tehdejších dobách nepoužívali ani zdaleka takových materiálů, které jsou používány v dnešní době, ale základní princip byl prakticky stejný – tehdejší umělci vyráběli modely nejčastěji z včelího vosku, na které pak nanášeli vrstvu vhodné hlíny.

Metoda vytavitelného modelu zažívá svůj nástup na poli průmyslu až v době druhé světové války, kde se ukázalo, že písková dělená forma nemůže vytavitelnému modelu ani zdaleka konkurovat. V průběhu druhé světové války zažívá metoda vytavitelného modelu obrovský rozmach – tehdejší pokroky na poli chemie, strojírenství i ostatních vědních oborů umožnily obrovský skok, který metoda vytavitelného modelu zažila – nikdy by bez tohoto pokroku nebylo možné např. odlévat velmi složité tryskové motory, další součásti pro raketovou techniku, které jsou vyrobeny z prakticky neobrobitelných materiálů.



Obr.1 - Hlava Ramsese II. - 1292 – 1225 let před Kristem

## 3. VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU

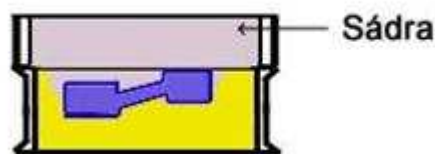
### 3.1. Výroba formy na modely [1],[2],[3],[4]

Výroba formy je jedním z určujících faktorů toho, jak bude odlitek po odlití vypadat. Vnitřní rozměry formy kopírují povrch voskového modelu, proto musí splňovat nároky kladené na následnou přesnost odlitku. Konstruktoři musí mít při navrhování forem na paměti velké množství faktorů, které mohou ovlivnit následnou přesnost odlitku, nebo případný výskyt vad v odlitku – jsou to např. smršťování vosku při tuhnutí, roztahování formy při jejím zahřívání a samozřejmě rozměrová přesnost, tolerance a drsnost povrchu.

Rozdělení výroby:

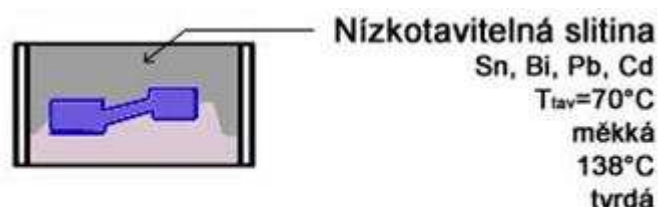
Podle matečného modelu:

- a) **Formy ze sádry** – lze je použít pouze na výrobu jednotlivých kusů, které nemají předepsané rozměrové přesnosti. Většinou je tato metoda výroby formy použita pouze tehdy, když ověřujeme zvolený technologický postup výroby odlitku.



Obr.2 – Zalévání matečného modelu do sádry [3]

- b) **Formy z nízkotavitelných slitin** – jejich předností je velmi rychlá, jednoduchá a poměrně levná výroba. Matečný model je v dělicí rovině zalit kovem z nízkotavitelné slitiny – tím je získána jedna polovina formy, dále je tato polovina otočena a zalita nízkotavitelným kovem s jinou teplotou tavení (nižší), než první polovina, aby nedošlo k natavení dělicí roviny a následnému spojení obou částí. Tento typ forem se z důvodu malé životnosti používá pouze pro výrobu menších sérií výrobků.



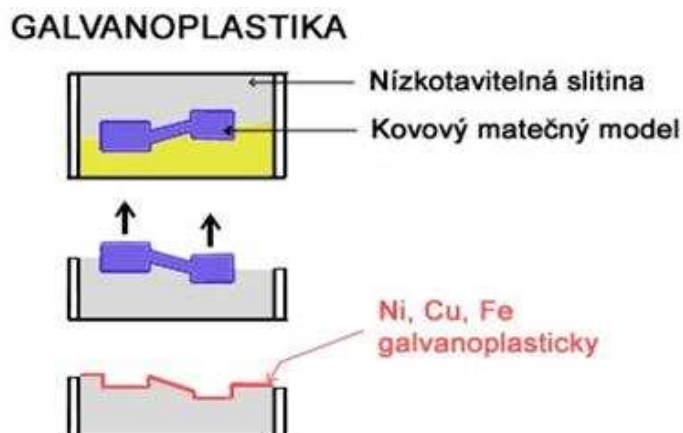
Obr. 3 – Forma z nízkotavitelných slitin [3]

- c) **Formy vyrobené metalizováním** – tento způsob se používá v případě, velké složitosti dělicí roviny a tam, kde by byla výroba formy obráběním velmi nákladná. Tato metoda výroby spočívá ve vrhání roztavených částecek kovu z metalizační pistole, kde se kov elektrickým obloukem nebo plamenem taví, na povrch matečného modelu, kde se částecčky spojují ve velmi tenký kovový film – cca 3mm. Takto vytvořená skořepina se dále zalije epoxidovou pryskyřicí (aby nedošlo k jejímu poškození). Nevýhoda těchto forem spočívá v malé variabilitě – když se jednou vyrobí, už se jenom těžko opravuje.



Obr.4 – Výroba formy metalizací [3]

- d) **Formy vyrobené galvanoplasticky [5]** – tato metoda není sice příliš známá, ale umožňuje nám výrobu forem, které není možné vyrobít žádným způsobem obrábění. Tato metoda funguje na principu elektrolýzy, kdy se model ponoří do elektrolytu a nechá se na něj nabalit vrstvu kovu (nejčastěji měď, nikl, nebo jejich sloučeniny) o tloušťce 0,4 – 4mm. Následně se takto vyrobená skořepinu zalije podobně jako u metalizace do PES pryskyřic, nebo slitin hliníku. Takto vyrobené formy kopírují naprosto přesně povrch modelů (deženy, strukturu dřeva, leštěné povrchy)



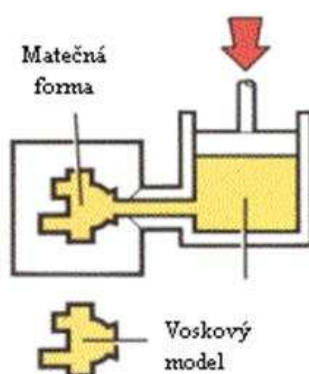
Obr. 5 – Výroba formy pomocí galvanoplastiky [3]

- e) **Obráběním z kovových bloků** - tento způsob výroby forem je v dnešní době používán nejčastěji a hlavně v těch případech, kdy je požadována výroba velkých sérií a také dlouhá životnost formy. Nejčastěji se při výrobě forem obráběním používá ocel a hliníkové slitiny. Je to jediný způsob výroby formy, při kterém není třeba mít vyhotoven matečný model součásti. Modely vyrobené touto metodou jsou nej přesnější, avšak forma vyrobená touto technologií je velmi drahá. Další problém při výrobě forem touto technologií je, když jsou v odlitku dutiny mimo dělicí plochu – tyto modely musí mít výsuvná jádra, která se musí velmi složitě a pracně uvnitř formy lícovat.



Obr. 6 – Forma vyrobená obráběním i s modelem [4]

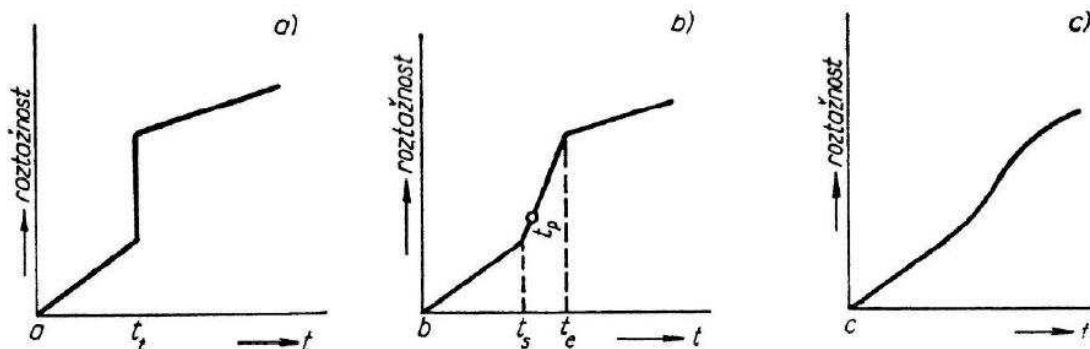
### 3.2. Zhotovení voskového modelu[1],[2],[3],[4]



Obr. 7 – Schéma výroby modelu

Voskové modely pro přesné lití je možné vyrábět dvěma způsoby, buď odstříkem pod zvýšeným tlakem pomocí vstřikolisů, nebo gravitačním litím. Vzhledem ke složitosti odlitků, se gravitační lití voskových modelů používá pouze zřídka, nebo pro odlévání jednoduchých modelů, či pomocných kusů, jako distančních kroužků, nebo vtokových soustav. Pro odstřík voskových modelů pomocí vstřikolisů existují dvě technologie s rozdílem v pracovních

tlacích. Vstříkolisy pracující za vyšších tlaků (2,5 – 5 MPa) natlačují do formy vosk o poměrně vysoké viskozitě, zatímco vstříkolisy pracující za nižších tlaků (0,5 – 1 MPa) vstříkují vosk v tekutém stavu. Aby bylo možné správně zvolit technologii, kterou se dále budou modely vyrábět, je nutno znát, jakým způsobem se vosk chová při chladnutí.



Obr. 8 – Diagramy závislosti teploty na roztážnosti [4]

Na výše uvedených diagramech jsou patrné průběhy závislostí roztážnosti na teplotě vosku u jednosložkového vosku (a)), dvousložkového vosku (b)) a vosku, který má více složek (c)). Z grafů můžeme určit, že z hlediska roztážnosti je nejvhodnější odstříkovat vosk za co nejnižší teploty – to ale nelze z hlediska zabíhavosti vosku, proto je nutné hledat vždy optimální řešení.

Podle složení je rozlišeno několik základních typů vosků:

- a) **Neplněné** – sloučeniny více druhů vosků a pryskyřičných komponentů.
- b) **Plněné** – podobné složení jako výše uvedené, ale přidáváme pevné plnivo – povrch modelů je o něco hrubší, než u neplněných a emulzifikovaných vosků
- c) **Emulzifikované** - základ je podobný jako u neplněných vosků, ale jsou emulgovány vodou 7-30% - tyto vosky se vyznačují velmi hladkým povrchem

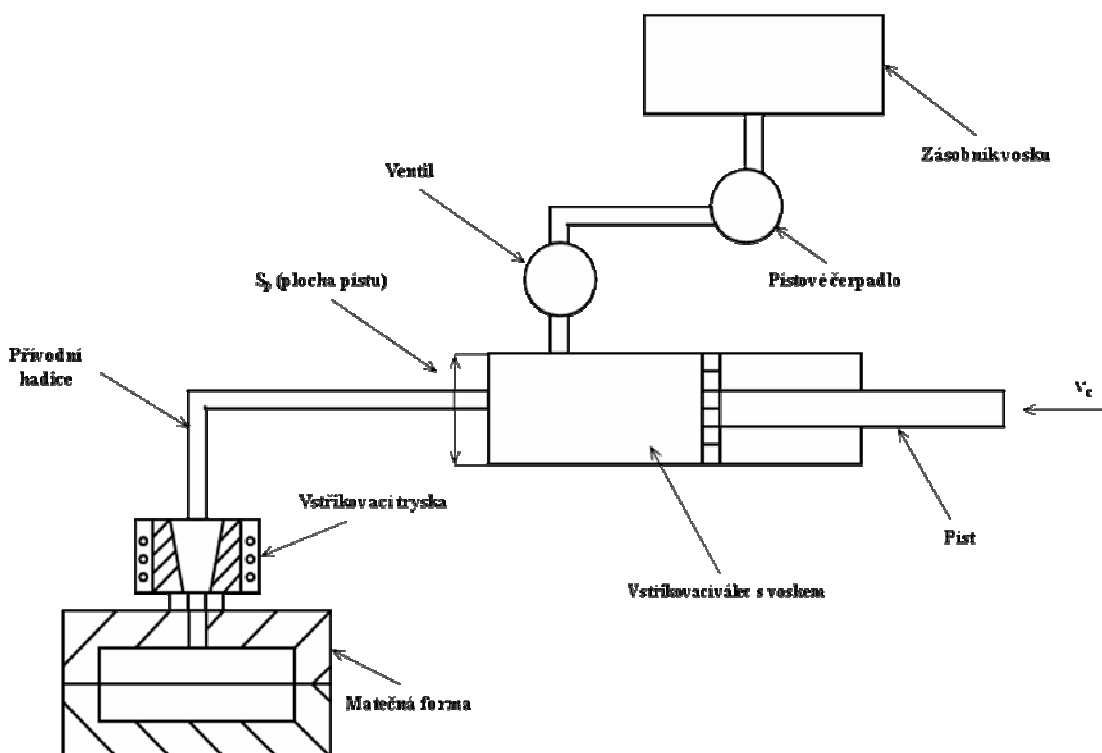
Mísením různých surovin a chemikálií je dosaženo u vosků požadovaných vlastností, a to:

- |                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| a) Bod tavení a tuhnutí  | f) Obsah popela (<0,05%)  |
| b) Tvrdost               | g) Pružnost               |
| c) Viskozita             | h) Povrchová kvalita      |
| d) Roztážnost/smršřivost | i) Stabilita vůči oxidaci |
| e) Rychlost tuhnutí      | j) Možnost regenerace     |



Obr.9 – Ukázky voskových modelů [7]

Zařízení pro odstřik vosku do formy za zvýšeného tlaku – vstříkolis:



Obr. 10 – Schéma vstříkolisu

V zásobníku vosku, který je ohříván, je tekutý (viskózní) vosk, který je promícháván. Vosk je veden potrubím a je poháněn pomocí pístového čerpadla. Při otevření ventilu se vosk dostane do vstříkovacího válce, kde na něj na něj vyvine tlak píst. Vosk pod velkým tlakem proudí přes přívodní hadici, dále přes vstříkovací trysku až do formy, kterou vyplní.

### **3.2.1. Používané voskové směsi [6],[7],[8],[9]**

Vývoj voskových směsí a technologie výroby voskových modelů je odvislá od požadavků na stálé snižování ceny výrobků a požadavků na lepší vlastnosti. Dalšími faktory, které ovlivňují vývoj voskových směsí, jsou možnosti recyklace a znovupoužití vosků a vlastnosti jako tepelná roztažnost, zabíhavost a adheze, které nám přímo ovlivňují přesnost odlité součásti.

**Plněné modelové vosky** – tento typ vosků je v dnešní době nejpoužívanější. Díky širokému spektru plniv je vyráběna velká škála typů vosků, které mají dobré vstříkovací vlastnosti. S těmito vosky pracujeme v celém spektru viskozity.

**Emulzifikované modelové vosky** – s těmito typy vosků se také pracuje v celém spektru viskozity, ale vzhledem k jejich vlastnostem se používají spíše tehdy, když existují speciální nároky např. na povrch hotové součásti. Tyto vosky se vstříkují v tekutém nebo těstovém stavu. Další jejich výhodou je velmi malá adheze k povrchu formy, což usnadňuje vyjímání modelů.

### **3.2.2. Technologie odstříku [10],[11]**

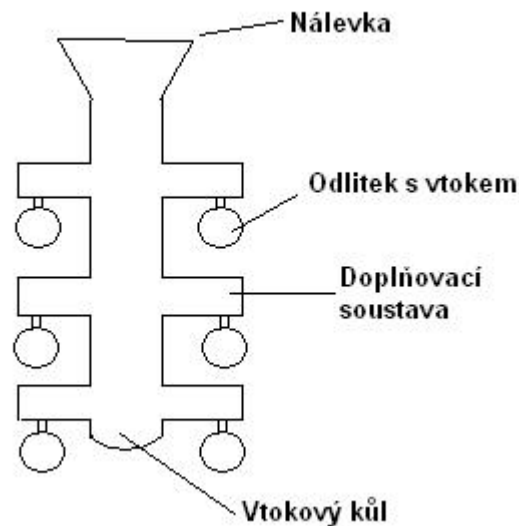
Jak již bylo zmíněno, v dnešní době probíhá výroba naprosté většiny voskových modelů odstříkem pomocí speciálních přístrojů, zvaných vstříkolisy. Tyto vstříkolisy jsou konstruovány vždy pro daný typ vosku (odstřík vosku v tekutém stavu, těstovitém stavu). Vzhledem k požadavkům na vysokou kvalitu povrchu a stále menší cenu odlitků je snaha o snížení teploty odstříku vosku – sice se zvyšují tlaky, kterými vosk odstříkujeme a zhoršuje se zabíhavost vosku, ale kvalita a přesnost odlitků je mnohem vyšší (nedochází zde k tak velkému smrštění vosku po zatuhnutí).



Obr. 11 – Vstříkolisy [12]

### 3.3. Sestavování voskových modelů [1],[2],[3],[4]

Hotové voskové modely jsou přesouvány z modelárny na pracoviště, kde jsou připojeny ke stromečkům. Zde jsou modely začištěny od menších nepřesností, či voskových výronků. Z ekonomického hlediska by bylo velmi nevýhodné odlévat např. některé z menších odlitků kusově, proto se přistupuje k hromadnému odlévání několikátí kusů najednou. Toto je dosaženo připojením několika voskových modelů ke vtokové soustavě.



Obr. 12 – Stromeček

Uspořádání, tvar stromečku a počet odlitků umístěných na stromečku navrhuje technolog s ohledem na vlastnosti materiálu, který odléváme – materiál musí vyplnit celou dutinu formy tak, aby se neobjevovaly žádné chyby v odlitcích. Při sestavování stromečků je použito jednoduché metody natavení stykových ploch a jejich následné slepení. Prvně se připevní ke vtokové soustavě (nálevka, vtokový kůl) doplňovací soustavy a na ty se pak připevňují jednotlivé modely odlitků, popřípadě technologem navržený systém nálitků, nebo výfuků (pro odvedení modelového vosku při vytavování). Následný tvar stromečku ovlivňuje další technologický postup, a to:

- techniku obalování
- způsob vytavování
- způsob lití
- oddělování odlitků od vtokové soustavy

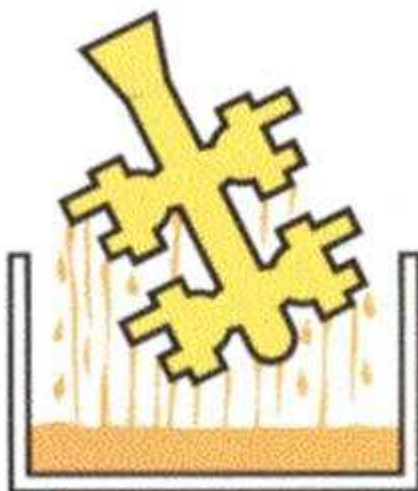
Pro zjednodušení následné manipulace a technologických postupů v metodě vytavitelného modelu je v dnešní době snaha o tzv. standardizaci vtokových soustav.

## 4. VÝROBA KERAMICKÉ SKOŘEPINOVÉ FORMY

### 4.1. Obalování [1],[2],[3],[4]

Je nutné provést odstranění zbytků separátoru po odlití z povrchu stromečků, kdyby se separátor neodstranil, je zde velké riziko, že první vrstva obalu nepřilne a v průběhu dalších technologických operací vlivem tepelných pnutí skořepina praskne. Pro lepší přilnutí první vrstvy keramické břechky se někdy povrch odlitku velmi jemně naleptá.

Po odstranění separátoru následuje namáčení v keramické břechce, která se skládá ze dvou základních částí, a to pojiva (voda, alkohol) a plniva (mikročástice žáruvzdorného materiálu). Celý stromeček se ponoří do keramické břechky a je s ním otáčeno a pohybováno tak, aby se břechka dostala do všech míst na celém stromečku – pokud by se tak nestalo, je velké riziko zničení formy při sušení, či následném žháním, nebo zmetkovitosti odlitku odlitého do takto vytvořené formy. Po vyjmutí stromečku je nutné nechat okapat přebytečnou břechku.



Obr. 13 – Namáčení do keramické břechky [3]

Po řádném namočení stromečku následuje posyp zrnitým, žáru-odolným, keramickým ostřivem. Při posypu je možné použít dvou způsobů nanášení ostřiva na stromeček:

- a) **Fluidní posyp** – stromeček je ponořen do vzduchem čeřeného ostřiva
- b) **Sprchový posyp** – stromeček je sprchován ostřivem

Posypové směsi jsou ze zirkonu, korundu, molochitu, křemene, silimanitu, atd. Tyto posypové směsi se také rozdělují podle zrnitosti od 0,175mm až po 0,5mm. Jemnější směsi (0,175 – 0,25) slouží k vytváření tzv. lícovacích vrstev – první (někdy i druhá) vrstva ostřiva – je to z důvodu vytvoření lepšího povrchu na následném odlitku. Další vrstvy jsou pak obalovány pomocí hrubších směsí

(0,25-0,5mm) – hrubšími směsmi se obaluje z důvodu lepší prodyšnosti formy a tím pádem lepšimu odvodu plynů při odlévání.



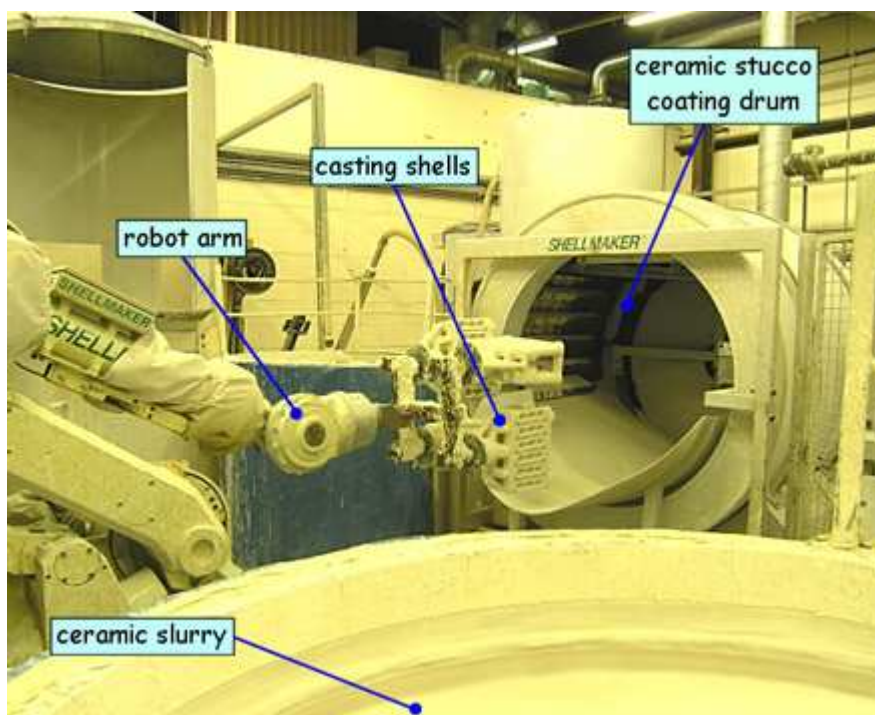
Obr. 14 – Sprchový posyp keramickým ostřivem [3]

Tento postup se opakuje 8-12x, dokud se nevytvoří potřebný počet obalových vrstev. Počet těchto vrstev závisí na složitosti odlitku a kvalitě a vlastnostech obalovacích materiálů. Mezi každými dvěma obalovými vrstvami je nutno formu vysušit. Děje se tak většinou v klimatizovaném prostoru s dostatečnou cirkulací vzduchu při teplotě  $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  při relativní vlhkosti 30-60%. Tyto uvedené hodnoty se mohou lišit v závislosti na pořadí obalu, typu obalové směsi a břečky.

Při obalování velmi složitých odlitků se zařazují do forem keramická jádra, pomocí kterých se vytvářejí velmi složité dutiny, předlité otvory, apod. Jádra se zhotovují vylisováním z keramické hmoty a následným vyžháním, či jinou tepelnou úpravou, která nám zaručí dostatečnou pevnost a odolnost jader.

#### **4.1.1. Nové metody obalování [13],[14]**

V dnešní době, kdy je velmi důležitá efektivita práce a s tím spojená cena odlitku se čím dál více přikračuje k co největší automatizaci procesu z důvodu toho, že stroj má stále stejnou účinnost a odpadá zde chyby, které jsou způsobeny vlivem lidského faktoru. Právě z těchto důvodů jsou ve slévárnách používány automatické obalovací linky a roboti. Do robotizovaného ramene je uchycen stromeček s modely, za současné rotace je ponořen do keramické břečky. Jakmile je stromeček dostatečně namočen, robotické rameno jej přesune do posypové nádoby, kde je celý stromeček pokryt ostřivem.



Obr. 15 – Obalovací robot [15]

#### **4.1.2. Břečky v současnosti [16],[17],[18]**

V dnešní době je používáno několik typů keramických břeček, nejčastěji se však používají koloidní roztoky křemíku. Tyto roztoky se skládají z nanometrických částic křemíku a vody, nebo jiného média (např. alkoholy). Výhodou takových břeček je jejich chemická stálost a to, že jsou schopny odolávat i velmi vysokým teplotám, proto se používají pro odlévání širokého spektra materiálů.

Dalším typem jsou břečky na bázi zirkonu. Tyto břečky se vzhledem ke své velmi vysoké teplotní a chemické stálosti užívají při metodách tzv. rychlého odlévání například v zubním lékařství. Pro výrobu klasických součástí ve slévárnách se tyto břečky moc nepoužívají vzhledem ke své vysoké ceně.

V dnešní době se rozvíjí další metoda výroby břeček na bázi přidání hliníku do koloidního roztoku křemíku. Tyto břečky byly s úspěchem použity při odlévání kovu na bázi Cu, Ni, Fe, Al, nereagují s odlévaným kovem a nevykazují takové namáhání při rekrystalizaci, jako břečky bez příměsí. Navíc vykazují lepší vlastnosti povrchu po odstranění skořepiny.

#### **4.1.3. Posypové směsi v současnosti [19],[20]**

V dnešní době je využíváno výše zmíněných posypových materiálů a jejich kombinací tak, aby bylo dosaženo co nejlepší vlastnosti skořepiny a její cena byla přijatelná. Nejčastěji se používají směsi Zr(Al)-Si, Molochitové směsi, směsi na bázi taveného křemene a sillimanitu.

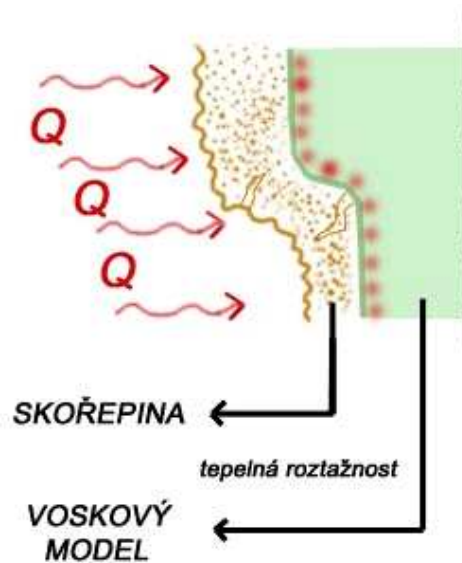
## 4.2. Vytavování [1],[2],[4]

Jakmile je zhotovena poslední vrstvu obalu a obal je řádně vysušen, může se přikročit k další operaci, kterou je vytavování – aby bylo možné do skořepiny odlévat, je nutné z ní odstranit vosk.



Obr. 16 – Vytavování vosku [3]

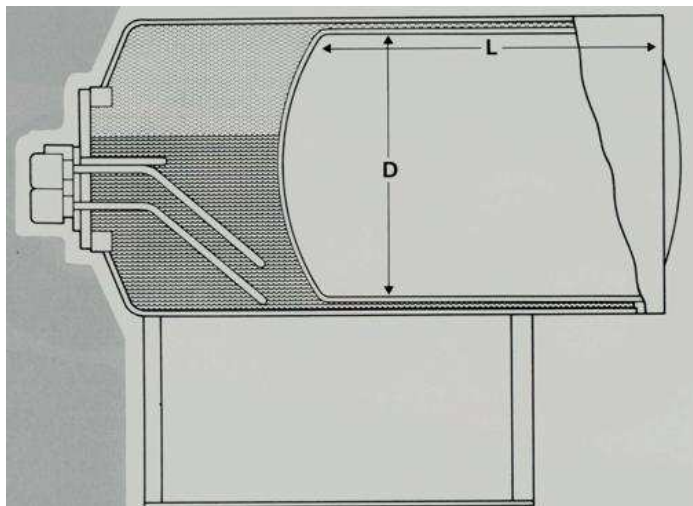
Metoda vytavování je založena na nízké teplotě tavení vosků (60-90°C), nastává zde však problém s tím, že vosky mají daleko vyšší tepelnou roztažnost – pokud by se ohřev prováděl rovnoměrně a za nižších teplot, skořepinová forma by vlivem sil způsobených roztažením voskového modelu popraskala. Právě proto se zde používá metody založené na aplikaci tepelného šoku, kdy teplota skořepiny je mnohem vyšší, než voskového modelu, tím pádem se povrch modelu nataví a vytvoří dilatační spáru, která zachycuje veškeré rozměrové změny voskového modelu a zabraňuje působení tlakových sil na skořepinu.



Obr. 17 – Působení tepelné roztažnosti a vznik dilatační spáry [3]

Pro vytavování se používá několik technologií:

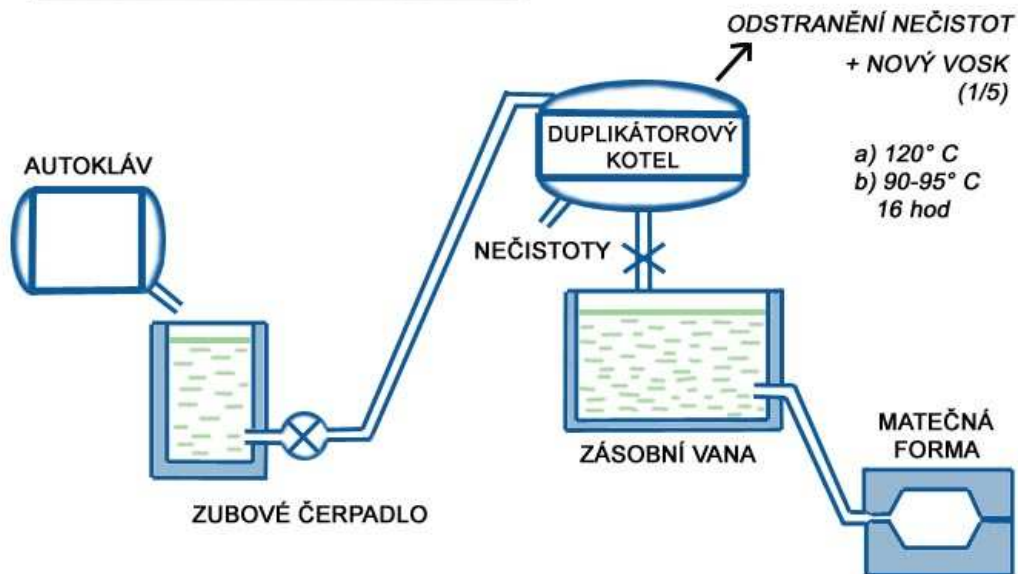
- 1) **Vytavování v bojlerklávu** – v dnešní době nejpoužívanější technologie. Tento způsob vytavování funguje na principu ohřevu přehřátou párou za zvýšeného tlaku. Pára v zařízení má 170 – 180°C a tlak 6-8 atm (0,6 – 0,8 MPa). Hlavními výhodami tohoto způsobu vytavování jsou – vysoká účinnost, velmi dobré vlastnosti páry pro přenos tepla a jednoduchý sběr vytaveného vosku pro jeho následnou regeneraci a zpětné použití.



Obr. 18 – Bojlerkláv [3]

- 2) **Vyžihání** – tzv. „Flash fire system“ se provádí v žíhací peci za vysokých teplot (900 – 1000°C). Při použití tohoto systému vytavování se zároveň keramická skořepina vypaluje. Tento systém není tak často používán z důvodu znehodnocování vosku – cca 15% se spálí při samotné vytavování, zbytek vosku ztrácí patřičné vlastnosti.
- 3) **Vytavování pomocí mikrovlnného tunelu** – v dnešní době vyvíjená a testovaná metoda vytavování vosků. Velkou výhodou této metody je ta, že se dá plně automatizovat – lze ji zařadit přímo do automatické linky, kdy stromeček projede přes tunel (velká mikrovlnná trouba) přímo do žíhací pece, kde se forma zrovna vypálí. Navíc je tato metoda velmi levná, nedochází zde ke znehodnocování vosku a nevznikají žádné spaliny, kouř ani žádné jiné nečistoty. Princip metody je takový, že se skořepina lehce navlhčí a umístí se do mikrovlnného pole. Zde se skořepina velmi rychle zahřeje, což zapříčiní vzniku dilatační spáry mezi stěnou modelu a vnitřní stěnou formy. Díky vysoké teplotě a rovnoměrnému zahřátí celé formy probíhá vytavování vosku velmi rychle a efektivně.

Vytavený vosk není odpadním materiálem. Vosk projde procesem regenerace a lze jej použít znovu – většinou jeho poměrné množství, protože dochází ke ztrátám, které jsou závislé na způsobu vytavování.

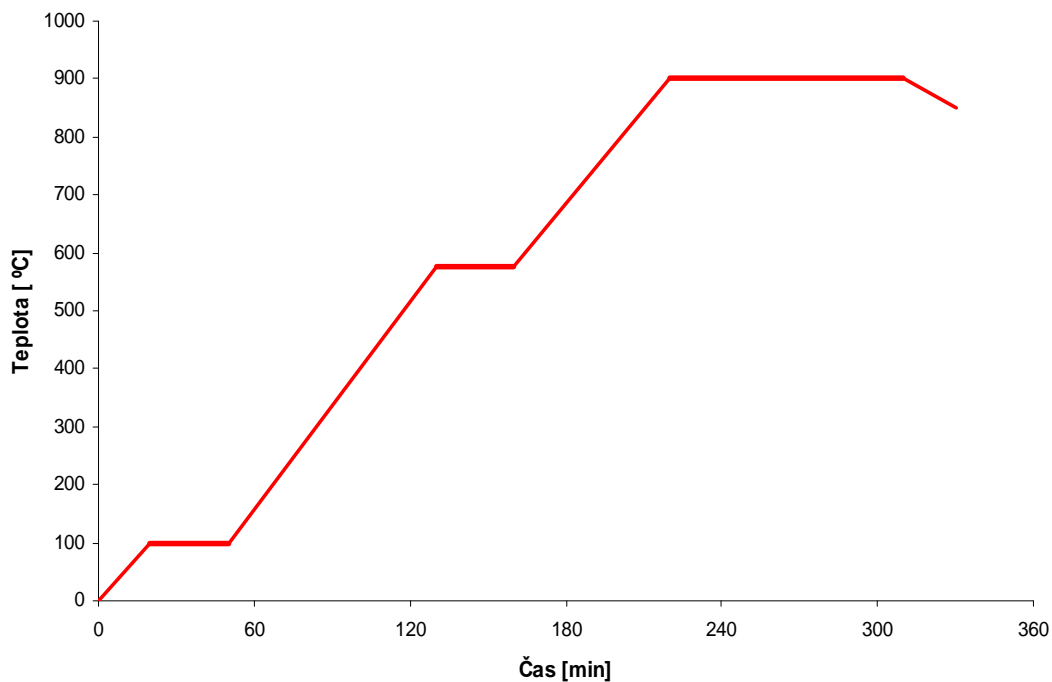


Obr. 19 – Proces regenerace vosku [3]

### 4.3. Žihání skořepiny [1],[2],[4]

Po vytavení voskového modelu ze skořepiny je na řadě další technologická operace, a to vyžihání skořepiny. Žihání se provádí ze tří základních důvodů:

- 1) Dosažení optimální pevnosti a tvrdosti formy - při vyšších teplotách dochází ke změně amorfní formy vazné vrstvičky  $\text{SiO}_2$  na vrstvu krystalickou.
- 2) Předehřev formy před samým odléváním – pokud by se odlévalo do nevyžihané formy, kov by okamžitě po dotyku krystalizoval na stěně formy, což je nežádoucí u odlévání tenkostěnných odlitků (vznikají zmetky - do některých částí formy se kov nedostane)
- 3) Odstranění zbytků vosku a popela po vytavení vosku – alkoholové složky se odpařují již při teplotách do  $100^\circ\text{C}$ , je zde však i voda, obsažená v pojivech. Pro řádné odstranění všech nečistot a nežádoucích složek je třeba žihat na teplotách kolem  $1000^\circ\text{C}$ .



Obr. 20 – Postup při žíhání keramické skořepiny [3]

Jak je patrné z předchozího grafu, ohřev při žíhání probíhá postupně s určitými prodlevami. První výdrž na teplotě cca 100°C (asi 30 minut) slouží k odstranění jakýchkoliv zbytků vody, které se mohou ve skořepině vyskytovat. Dále následuje ohřívání cca 5°C/min a při dosažení teploty 575°C se ohřev zastaví a provede se výdrž na této teplotě (asi 30 minut), tato slouží k rovnoměrnému prohřátí formy a krystalografické přeměně křemene. Následuje ohřev na teplotu 950 – 1550°C, kde se provádí další výdrž. Na těchto teplotách se zlepšují vlastnosti formy – je inertní a stabilní. Volba žíhací teploty závisí na odlévaném materiálu a způsobu jakým se bude následně odlévat.

## 5. ODLÉVÁNÍ [1],[2],[4]

Proces odlévání je založen na principu nalití roztaveného kovu o předepsaných vlastnostech a předepsané teplotě do předehřáté keramické skořepiny. Vlastnosti kovu (chemické složení, atd.) se zjišťují odběrem vzorku z pece a jeho následným otestováním. V dnešní době je používáno několik způsobů odlévání:

### 5.1. Klasické lití

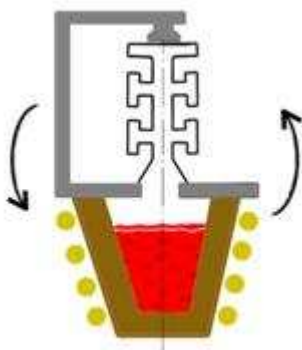
Při této technologii odlévání je předehřátá skořepina umístěna na lící pole (pro rovnoměrnější ochlazování je možné formu obsypat zahřátým křemenným pískem) a nalije se do ní roztavený kov. Při klasickém lití se využívá pro zatečení kovu pouze síla, kterou vyvine roztavený kov ve formě.



Obr. 21 – Gravitační odlévání [3]

### 5.2. Sklopné lití

Při tomto způsobu lití je skořepinová forma spojena pomocí ustavovací konzoly přímo k tavící peci. Samotné odlévání je prováděno nakloněním pece a tím pádem vyplněním formy roztaveným kovem. Z technologického hlediska je možné navrhnout formu tak, aby po opětovném naklonění pece do pracovní polohy vytekl kov nepotřebný ve formě zpět do pece.

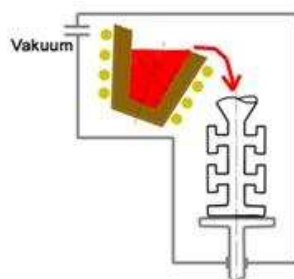


Obr. 22 – Sklopné lití [3]

V dnešní době zažívají v technologii odlévání na vytavitelný model rozmach technologie s použitím vakua. S použitím těchto technologií je možné odlévat i velmi reaktivní slitiny např. hořčíku. Při použití vakua při tavení a odlévání nedochází k oxidačnímu poškození roztaveného kovu, ani dalším nežádoucím chemickým reakcím kovu s vnějším prostředím.

### 5.3. Tavení a gravitační lití ve vakuu

Při užití této technologie je ve stejné vakuové komoře zároveň umístěna tavící pec i forma pro odlití. Do pece se nasází vsázková směs, vytvoří se vakuum a vsázka se roztaví, jakmile je dosaženo lící teploty, odlíje se a postupně se uvolní podtlak.

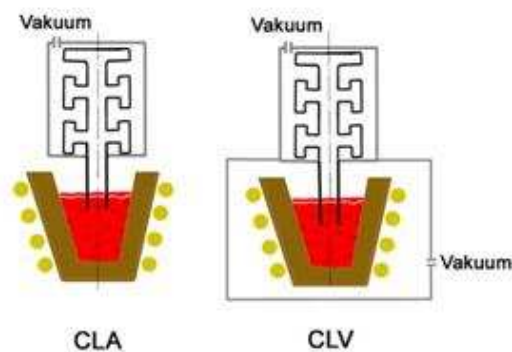


Obr. 23 – Vakuové gravitační lití

### 5.4. Vakuové nasávání (metody CLA/CLV)

Tyto dvě metody jsou si technologií velmi podobné, u metody CLA se netaví kov pod vakuem, u metody CLV však ano. Celý proces funguje tak, že se přesune hrdlo nálevky nad kelímek s roztaveným voskem a ponoří se do něj. Pomocí podtlaku vytvořeného vakuem se roztavený kov nasaje do skořepiny. Po částečném zatuhnutí kovu se podtlak uvolní a nezatuhlý kov z vtokového kanálu se vypustí zpět do tavící pece. Tyto metody mají velké množství výhod:

- Zvýšení množství odlitků na jednom stromečku – díky vysokému podtlaku, kterým nasáváme, je možné dokonale vyplnit mnohem větší a složitější formy
- Menší výrobní náklady – nepotřebný kov vyteče zpět do pece, tudíž jej není nutné znovu tavit
- Nižší lící teploty – díky vysokým podtlakům nasávání
- Díky vakuu nevznikají oxidy – odlévá se „čistší kov“ a v odlitcích nevzniká tolik vad



Obr. 24 – Vakuové nasávání

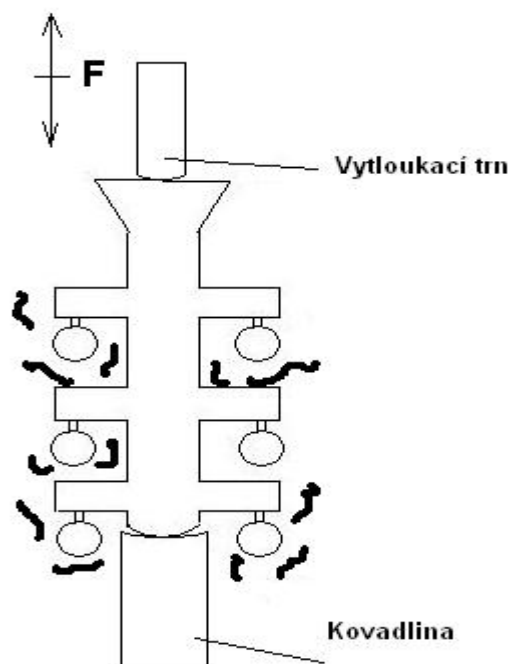
## 6. DOKONČOVACÍ OPERACE

Dokončovací operace se rozdělují do několika okruhů:

- 1) Oddělení hrubších částí skořepiny od odlitku
- 2) Odřezání odlitků od vtokových soustav
- 3) Dočištění odlitků od zbytků skořepiny
- 4) Odstranění vtoků
- 5) Broušení odlitků
- 6) Tepelné zpracování

### 6.1. Oddělení hrubších částí skořepiny od odlitku [1],[2],[4]

Jakmile kov ve formě zatuhne a zchladne, je třeba odstranit keramickou skořepinu. Skořepina po odlití bývá velmi tvrdá, proto se ve většině případů používá mechanické oklepávání – odlitek se umístí do vytloukací komory, které jsou patřičně utěsněny a odvětrávány, aby neprovozoval zbytečně velký hluk a aby prach, který se při oklepávání vytvoří, neunikal do ovzduší dílny. I přesto, že se snažíme minimalizovat doprovodné, nepříjemné efekty, patří tato operace k nejprašnějším a nejhlučnějším úkonům v celé technologii odlévání na vytavitelný model. Většina přístrojů pro mechanické vytloukání pracuje na principu pneumatického kladiva a kovadliny. Po zavření dvířek do komory se sepne čidlo a tím uvedeme kladivo do chodu. Díky jeho úderům skořepina popraská a velké kusy odpadnou.



Obr.25 – Vytloukání

Další metodou, která se používá v současnosti, je tryskání vysokotlakým paprskem, kdy skořepinu oddělujeme od odlitku pomocí tryskání vody pod vysokým tlakem na povrch skořepiny.

## **6.2. Oddělování odlitků od vtokových soustav [1],[2],[24]**

Po hrubém odstranění skořepiny přichází na řadu oddělení odlitků od vtokového kůlu. Pro další technologické zpracování by bylo ekonomicky nevýhodné opracovávat odlitky i s vtokovými soustavami, proto provádíme:

- 1) **Odřezávání odlitků mezi vtokovým kulem a samotnou součástí** - toto odřezávání se provádí buď pomocí klasických abrazivních pil (rozbrušovací kotouče), nebo pomocí třecích pil, které pracují za vysokých rychlostí a pomocí velmi jemných (tupých) zubů dochází k natavování řezné plochy a následné oddělení součásti od vtokového kůlu. Tato metoda je velmi efektivní, protože zde dochází pouze k minimální ztrátě materiálu.



Obr. 26 – Třecí pila [24]

- 2) **Vibračním oddělováním** – tento způsob lze použít u materiálů, které nejsou houževnaté, např. oceli s vyšším množstvím uhlíku. U tohoto způsobu oddělování se využívá únavy materiálu v cyklicky namáhaném kritickém průřezu, jehož účinek je ještě umocněn vrubem.

### 6.3. Dočištění odlitků od zbytků skořepiny [1],[2],[4]

Jakmile se součásti oddělí od vtokových soustav, může se přikročit k úplnému odstranění skořepiny ze všech míst, kde po vytloukání zůstala – většinou se jedná o rohy, dutiny, nebo jinak nedostupná místa. Existuje několik způsobů, jak odstraňovat zbylou skořepinu:

#### 6.3.1. Abrazivní metody

Tyto způsoby odstraňování skořepiny můžeme ještě dále rozdělit na tlakové tryskání a tryskání bez použití stlačeného média.

##### 1) Tlakové tryskání s vodním zdrojem:

- *Otevřené* – tento způsob je využíván spíše pro odstraňování keramiky „nahrubo“
- *Uzavřené* – v uzavřené komoře je tryskán koherentní proud vody na odlitky. Voda na odlitky naráží ve vysoké rychlosti, proto je schopna odstranit i silnější vrstvu keramiky. Touto metodou jsme schopni otryskat celou keramiku nahotovo.

Velkou výhodou vysokotlakého tryskání vodou je to, že nevzniká tolik prašných nečistot a tudíž nedochází k takovému zhoršení pracovních podmínek jako u abrazivního tryskání se vzduchovým zdrojem.

- ##### 2) Tlakové tryskání s vzduchovým zdrojem:
- tato metoda, jak je patrné z názvu, využívá pro otryskávání keramiky stlačeného vzduchu, který pod vysokým tlakem vhání abrazivní brusivo (ocelové broky, litinovou drť, keramickou drť) do uzavřeného boxu, kde jsou odlitky tryskány.



Obr. 27 – Tlakové tryskací zařízení [25]

Nevýhodou této technologie je nutnost dobrého odvětrávání boxů a celé dílny kvůli tomu, že keramika se z odlitků prakticky odbrušována, tudíž vzniká velké množství křemíkového prášku, který uniká i do ovzduší dílny. Pokud by nebylo odvětrávání dobře vyřešeno, hrozí zdravotní komplikace pracovníků v podobě onemocnění dýchacích cest (silikóza, apod.).

- 3) **Beztlaké tryskání** – při tryskání touto metodou nepoužíváme ani stlačeného vzduchu, ani vody. Abrazivní částice jsou vháněny na rotující lopatky, které tyto částice rozprašují po součástech.

### 6.3.2. Chemické metody

Pomocí těchto metod se odstraňují zbytky keramiky pomocí chemických reakcí lázně, do které se odlitky ponoří a odstraňované keramiky. Existují dvě metody, pomocí kterých jsme schopni odstraňovat keramiku, a to:

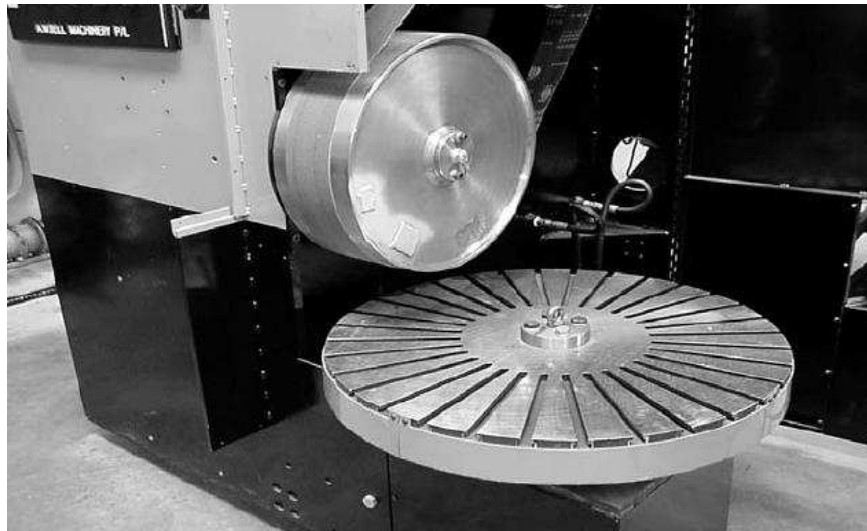
- 1) **Lázeň s rozpuštěnou solí** – solná lázeň je složena z hydroxidu sodného, ke kterému jsou (nebo nejsou) přidávány vyrovnávací aditiva. Sůl je rozpouštěna v ocelové vaně, která je ohřívána na teploty 475-600°C. Rozpuštěná sůl velmi dobře odstraňuje zbytky křemičitanů z povrchu součástí. Doba ponoření odlitků by měla být alespoň 20 minut. Po této době by měly být odlitky zcela očištěny od zbytkové keramiky. Po vytažení z lázně se odlitky opláchnou, aby se odstranil zbytek solného roztoku, který zůstal na povrchu odlitku. Po opláchnutí se odlitky ponoří do neutralizační kyseliny, aby se odstranily okuje.
- 2) **Horká vodní žíravá lázeň** – tyto lázně pracují s hydroxidem draselným o koncentraci 5-30%. Teplota při máčení se pohybuje kolem 80°C a odlitky musí být pro dokonalé odstranění skořepiny ponořeny několik hodin. Po odstranění skořepiny jsou odlitky opláchnuty teplou vodou a sušeny.

Odstraňování skořepiny chemickým metodami je sice velmi čistá a pohodlná metoda, na druhou stranu je však také velmi drahé. Proto se používá většinou v případech, kdy se skořepina nedá odstranit jinými metodami, nebo když hrozí při použití jiných metod poškození součástí.

### 6.4. Broušení odlitků [1],[2],[4]

Broušení je abrazivní metoda odstraňování menších vad vzniklých při odlévání součástí, nebo samotného napojení součásti na vtokový kůl, které nemá na konečném výrobku žádnou funkci. Takové vady mohou být např. výronky kovu v ostřejších hranách odlitků, nebo některé optické vady na povrchu odlitků. Některé z těchto vad by mohly působit problémy při konečném zapojení, nebo funkčnosti výrobku, proto musí být odstraněny. Ve slévárnách se většinou používají brusky horizontální, vertikální, zapichovací, s výkyvným rámem a velké množství ručních brusek.

V dnešní době se rozvíjí technologie tzv. rychlého broušení (rapid grinding), kdy je proces broušení částečně automatizovaný. Do přípravku se upne několik součástí a pak se brousí za pohybu přípravku pomocí pásu vyrobeného z abrazivního materiálu, který je poháněn velkou rychlostí. U tohoto způsobu broušení lze docílit přesnou opakovatelnost díky tomu, že přístroje pro tento způsob broušení lze naprogramovat. Výhody rychlého broušení jsou: Vysoká rychlost broušení, vysoká efektivita a stálý výkon. Nevýhodou je to, že stroj je pevně naprogramován a není tudíž schopen reagovat na jiné chyby, které mohou u odlitku nastat.

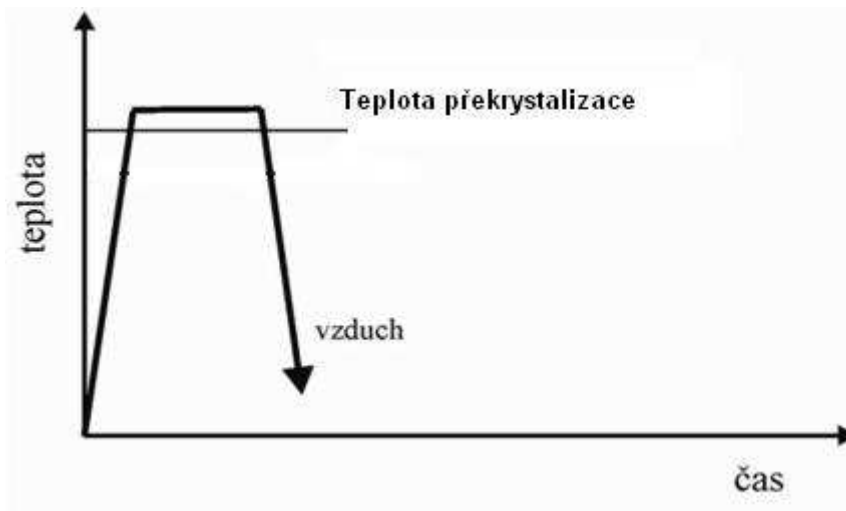


Obr. 28 – Příklad na rychlé broušení [26]

## 6.5. Tepelné zpracování [27]

Tepelné pochody, při kterých se mění mechanické nebo fyzikální vlastnosti odlitků bez tvarové nebo rozměrové změny. Slouží například k homogenizaci nerovnoměrné lící struktury, k dosažení vyhovujících mechanických vlastností, ke zjemnění zrna, k odstranění vnitřních pnutí, ke zlepšení obrobiteľnosti. Podle účelu tepelného zpracování odlitků se řídí volba vhodného postupu, například u odlitků z oceli se nejčastěji používá normalizační žíhání, u odlitků z šedé litiny žíhání k odstranění pnutí, u odlitků z neželezných kovů homogenizační žíhání a vytvrzování. Další možnou metodou tepelného zpracování je kalení, ať už do vody, nebo do oleje.

- a) **Normalizační žíhání** – jak už bylo řečeno, toto žíhání je používáno nejčastěji u odlitků z oceli, řídí se proto metastabilním diagramem Fe-Fe<sub>3</sub>C. Součást ohřejeme 30 – 60°C nad teplotu A<sub>3</sub> a součást se na této teplotě drží 1-4 hod. Po této výdrži se součást rovnoměrně ochladí na vzduchu. Tento proces má za výsledek zjemnění zrna, dosažení rovnoměrnější struktury a také stejnoměrných vlastností materiálu.



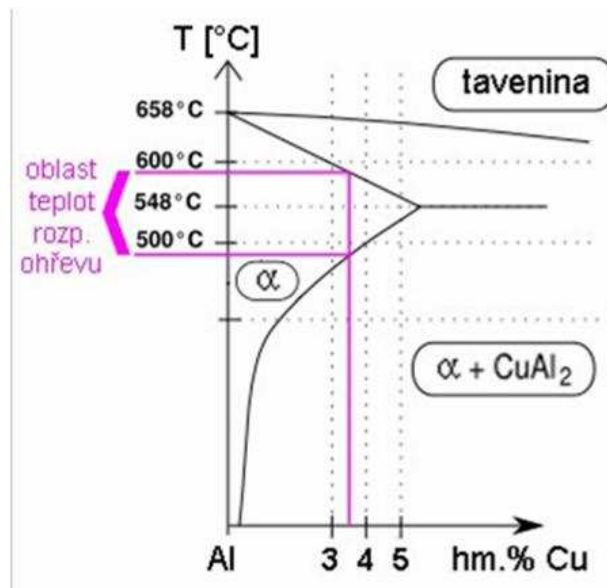
Obr.29 – Normalizační žíhání [27]

- b) **Žíhání k odstranění pnutí** – toto žíhání probíhá bez rekrystalizace. Součást se ohřeje těsně pod rekrystalizační teplotu a provedeme výdrž (max. 2 hod). Po této výdrži se součást ochladí velmi pomalu a rovnoměrně, nejlépe v peci. Tímto žíháním se dosahuje obnovy struktury kovu v případě nerovnoměrného chladnutí a vzniku vnitřních deformací zrn a vměstků ve struktuře.



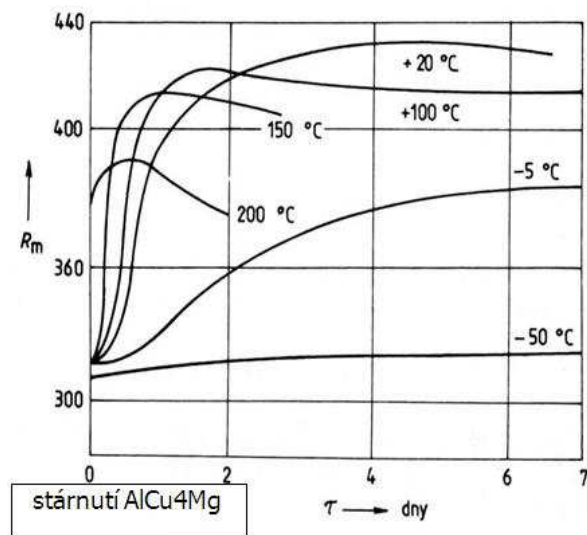
Obr. 30 – Žíhání k odstranění pnutí [27]

- c) **Homogenizační žíhání** – probíhá nad teplotou rekrystalizace. Slouží k zamezení difuzního odmišení legur z matečného zrna. Materiál se ohřeje a legury, které byly v průběhu chladnutí vyloučeny z matrice, difundují zpět do matrice. Výsledkem je celkové zlepšení vlastností materiálu. Provádí se při vysokých teplotách, kde dochází ke zrychlení difuzních procesů.
- d) **Vytvrzování** – skládá se ze tří částí: rozpouštěcí žíhání, rychlé ochlazení a stárnutí. Součást se ohřeje nad teplotu rekrystalizace a vytvoří se homogenní tuhý roztok.



Obr. 31 – Rozpouštěcí ohřev kovu [27]

Následně se prudce ochladí na teplotu 20°C a na této teplotě se provede dlouhá výdrž. V této výdrži se částečně difundují příměsné prvky a vytvářejí koherentní precipitáty na hranicích matečných zrn. Toto má za následek malé snížení tvrdosti a pevnosti a velký nárůst tažnosti a houževnatosti materiálu, tuto fázi vytvrzování nazýváme stárnutí.



Obr. 32 – Příklad stárnutí hliníkové slitiny [27]

- e) **Kalení** – je metodou tepelného zpracování, kterou se vytváří z rovnovážné struktury struktura nerovnovážná. Provádí se jej u ocelí a to tak, že se součást ohřeje na kalicí teplotu a následně prudce ochladí v kalicí lázni. Kalicí lázeň je většinou pokojové teploty a je olejová, nebo vodní.

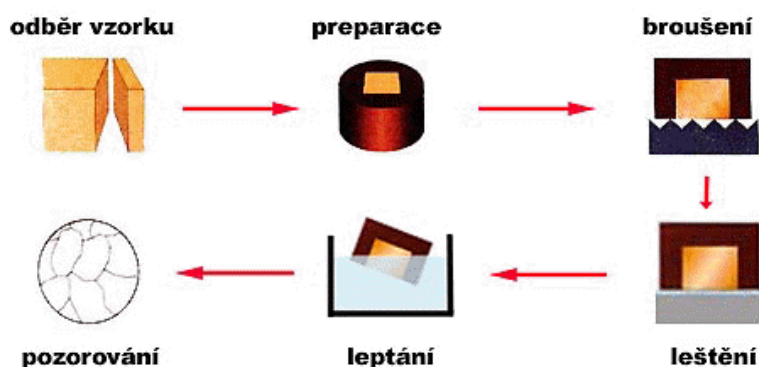
## 7. KONTROLA JAKOSTI ODLITKŮ

V dnešní době se pomocí metody vytavitelného modelu vyrábí velmi přesné součásti, které velmi často není nutno dokončovat obráběním, nebo je třeba obrobit jen některé funkční plochy, na které jsou kladeny velké přesnosti a povrchová kvalita. Je třeba však kontrolovat i možné vnitřní vady odlitků, které mohou vznikat jak chybami způsobenými lidským faktorem při výrobě, tak např. nesprávně navrženým technologickým postupem. Dále se u odlitků kontroluje struktura odlitého materiálu a jeho mechanické vlastnosti. Vzhledem k stále větším nárokům na přesnost musí být stále zkvalitňovány i metody, kterými se přesnost odlitků kontroluje.

### 7.1. Destruktivní zkoušení

#### 7.1.1. Struktura a chemické složení

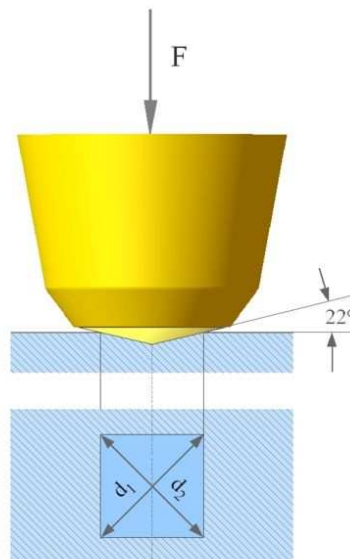
- 1) **Spektrometrie [28]** – nejrozšířenějším způsobem spektrometrie je tzv. atomová absorpční spektrometrie. Tento způsob zjišťování prvků v kovu je založen na rozdílné absorpci monochromatického záření různými prvky. Záření, které není absorbováno, je zachytáváno fotocitlivým snímačem a je z něj určen počet, druh a procentuelní zastoupení prvků v kovu. Tímto způsobem je možné určit až 60 druhů jednotlivých prvků.
- 2) **Metalografie [29]** – ze zkoušeného materiálu je vyříznut kus, na němž je broušením a leštěním vytvořen metalografický výbrus, který je kontrolován pod různými typy mikroskopů. Při tomto typu kontroly se určuje krystalická struktura a také množství jednotlivých prvků v kovu, ale ne tak přesně, jako u spektrometrie.



Obr. 33 – Postup při metalografii [29]

### 7.1.2. Mechanické vlastnosti

**Zkoušky tvrdosti [30]** – většina těchto metod je založena na principu vtlačování různých druhů geometrických těles do materiálu a následných přepočtů tvrdostí v závislosti na potřebném tlaku pro vytvoření protlačení do vzorku. Používá se velké množství zkoušek tvrdosti např. podle Brinella (ocelová kulička), Vickerse (diamantový jehlan se čtvercovou postavou), nebo Rockwella (ocelová kulička, nebo diamantový kužel).



Obr. 34 – Zkouška tvrdosti podle Vickerse [31]

Dále se stanovuje velké množství mechanických vlastností, jako jsou pevnost v tahu, tažnost, kontrakce, atd. tak, abychom byli schopni následně určit únosnost materiálu, ze které je součást vyrobena.

## 7.2. Nedestruktivní zkoušení

Jak název napovídá, jedná se o metody, u kterých není třeba nijak mechanicky zasahovat do zkoušené součásti.

### 7.2.1. Vnitřní jakost odlitků

- 1) **Kontrola rentgenem [32]** – tato metoda patří mezi základní nedestruktivní metody. Princip kontroly rentgenem je využití lokální změny intenzity pronikavého záření prošlého zkoušeným předmětem. Změna záření se registruje pomocí radiografického filmu, kde je v negativu zobrazen vnitřní objem zkoušeného předmětu. Při použití moderních systémů pro prozařování rentgenem, se používá rentgenových kabin, do kterých se zakládají odlitky a následně jimi může být uvnitř kabiny otáčeno a prosvěcováno rentgenem. Vše vyhodnocuje počítač.



Obr. 35 – Rentgenová komora [33]

- 2) **Kontrola ultrazvukem [34]** - patří mezi nejpoužívanější objemové metody - tj. hledání vnitřních vad v kovových a umělohmotných předmětech. Ultrazvuková metoda využívá vniku ultrazvukových vln do zkoušeného materiálu. Ultrazvukové vlny jsou do materiálu dopraveny přes ultrazvukovou sondu. Ultrazvukových sond je celá řada. Liší se hlavně úhlem, pod kterým vnikají ultrazvukové vlny do materiálu. Je-li ve zkoušeném materiálu nějaká nečistota, dojde ke zpětnému odrazu ultrazvukových vln do sondy. Na obrazovce přístroje se pak tento odraz („echo“) vyhodnocuje. Zkoušení ultrazvukem je zaměřeno především na zjišťování objemových vnitřních vad materiálu, plošných vad typu trhlin a zjišťování tloušťky stěn.



Obr. 36 – Kontrola ultrazvukem [35]

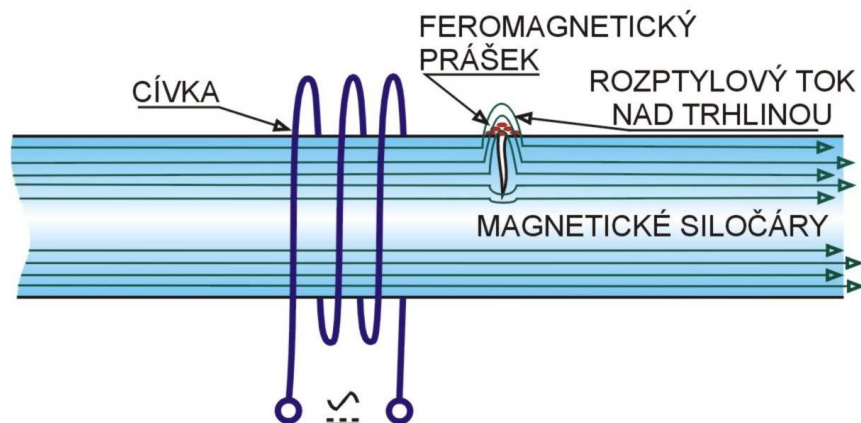
### 7.2.2. Vnější jakost odlitků

- 1) **Kapilární metody [36]** – tato metoda je určena pro kontrolu vad souvisejících s povrchem materiálu nebo součástí. Její výhodou je, že se může používat na materiálech magnetických, nemagnetických, kovových i nekovových. Touto metodou je možno zviditelnit povrchové vady typu trhliny, póry, nepřilnutí kompozic atd. Kvalitní provedení této kontroly sebou přináší určité nároky na okolní teplotu a kvalitu zkoušeného povrchu. Rozeznáváme dva druhy kapilárních metod – Barevné metody (využívají barevné zobrazení vady) a Fluorescenční (pro zobrazení vady používají UV záření)



Obr 37 – Kapilární metoda zkoušení [37]

- 2) **Magnetická metoda [38]** - patří mezi nejpoužívanější povrchové nedestruktivní metody - tj. hledání povrchových a těsně podpovrchových vad (do hloubky max. cca 5 mm) ve feromagnetických předmětech. Feromagnetický předmět, který se má kontrolovat, se vhodným způsobem zmagnetuje a na povrch se nanese feromagnetický prášek. V místě vady je magnetické pole deformováno, vystupuje nad povrch a vytváří tzv. rozptylový magnetický tok. Částice feromagnetického prášku jsou působením rozptylového pole přitahovány a v místě vad se seskupí. Takto vytvořené obrazce jsou obvykle charakteristické pro typ detekované nečistosti. Citlivost metody je největší pro povrchové vady a výrazně se snižuje se zvětšováním vzdálenosti podpovrchové vady od povrchu. Charakteristické typy vad, které je možno detekovat touto metodou, jsou např. trhliny, praskliny, zavaleniny a některé podpovrchové objemové vady.



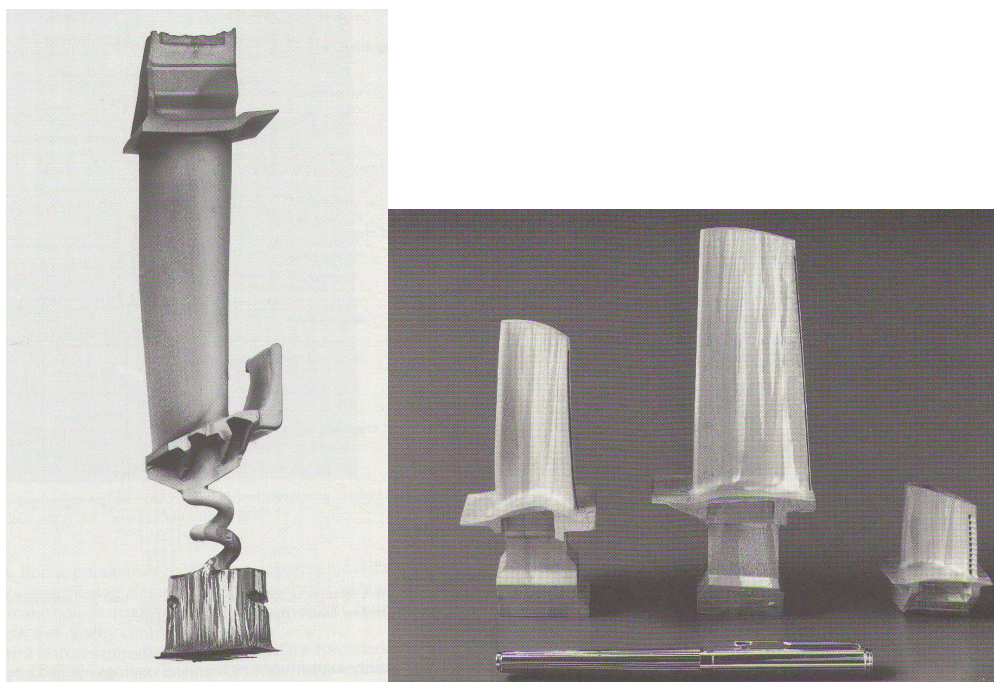
Obr. 38 – Princip magnetického zkoušení [39]

- 3) **Metoda vířivých proudů [40]** - snadno a jednoznačně odhalí v materiálu velmi jemné povrchové trhliny, různá korozní napadení, mechanické deformace, záměnu materiálu a těsně podpovrchové vady. Metoda je založena na principu vzniku vířivého proudu na povrchu vodivého materiálu, který je skrze sondu schopen detekovat vadu na povrchu materiálu. Pro správné nastavení přístrojů je v této metodě velmi nutné používat tzv. etalony s umělými vadami stejného materiálu jako je zkoušený kus.

Kromě uvedených způsobů zjišťování vad je samozřejmě do výrobního procesu zařazena kontrola základních rozměrů odlitků. Odlitky se kontrolují pomocí klasických měřidel, jako jsou šuplera a různé kalibry a komparační měřidla.

## 8. MOŽNOSTI APLIKACE VYTAVITELNÉHO MODELU

Vzhledem k nově nabývaným znalostem a technologiím je možné v dnešní době vyrábět odlitky z různých materiálů, rozličných tvarů a vlastností. Je možné odlévat např. chrom-niklové odlitky „nahotovo“, tyto odlitky pak odolávají teplotám až 750°C. Díky poznatkům z krystalizace a tuhnutí kovu lze tyto procesy řídit a to až tak, že je možné vytvořit některé součásti tak, že jejich strukturou je jeden velký monokrystal, nebo je možné krystalizaci a následnou strukturu řídit tak, že kov krystalizuje ve vrstvách. Tohoto se využívá např. u součástí namáhaných v jednom směru.



Obr. 39a, b – a/ Monokrystal b/ Usměrněné krystaly [1]

Hlavní oblasti využití metody vytavitelného modelu:

### 1) Letectví a kosmonautika

*Letecký průmysl - Airbus A380*



Obr. 40 – Využití odlitků v letectví [41]

## 2) Automobilový průmysl



Obr. 41 – Odlitek bloku motoru [42]

## 3) Zbrojní průmysl



Obr. 42 – Odlitky pro zbrojní průmysl [3]

- 4) Raketové systémy
- 5) Nukleární energie
- 6) Zdravotnictví



Obr. 43 – Kloubní náhrady[3]

- 7) Lodní průmysl
- 8) Sportovní příslušenství



Obr. 44 – Odlitek golfové hole [43]

#### 9) Hydraulika a armatury

Mezi speciální metody odlévání na vytavitelný model patří odlévání pro chirurgické účely, šperkařství a stomatologii.

V odvětví chirurgie se dostáváme v souvislosti s metodou vytavitelného modelu do oblasti kloubních a jiných náhrad. V dnešní době je, vzhledem k používaným materiálům, technologie přesného odlévání nejefektivnější výrobou těchto součástí, protože tyto materiály jsou jenom velmi těžko obrobitelné. V současnosti je snaha o zavedení tzv. „kloubních náhrad na míru“, kdy by se pro každého člověka zvlášť vyráběla kloubní náhrada individuálně, dle rentgenů příslušného kloubu.

Pro stomatologii jsou vyráběny odlitky na bázi zlata a příměsných kovů v podobě zubních náhrad. Tyto součásti vyrábíme odléváním z důvodu efektivity a úspory výrobních nákladů.

## 9. ZÁVĚR

Metoda odlévání na vytavitelný model je v dnešní době jedním z neprogresivnějších způsobů odlévání. Vzhledem k její variabilitě lze touto metodou odlévat velké množství materiálů a zhotovovat výrobky, které by byly jinými technologickými postupy těžko stvořitelné a tím pádem velmi drahé.

Tato práce se věnuje celému technologickému postupu výroby konečné součásti. V každé části práce jsou uváděny běžně používané technologie i technologie, které jsou v dnešní době rozvíjeny a zkoumány v rámci zlepšení kvality a snížení ceny konečného výrobku. V této rešerši je také zmiňována snaha o nástup automatizace do této technologické metody výroby odlitků.

Aby bylo dosaženo požadovaných přesností, je nutné odlitky kontrolovat příslušnými patřičnými přesnostmi. V této práci jsou podrobně rozepsány způsoby kontrolování odlitků v dnešní době. Kvůli vzrůstajícím nárokům na konečnou přesnost odlitků, musí vzrůstat i přesnost a kvalita měřicích zařízení a přístrojů a s tím spojena kvalifikovanost a odbornost pracovníků provádějících kontrolu.

V poslední části práce je věnována použitelnosti metody odlévání na vytavitelný model v současné době. V této části je uváděno, že metoda vytavitelného modelu je jednou z prakticky nenahraditelných technologií výroby součástí od letecké techniky až po chirurgii a stomatologii. Jsou zde zmíněny inovativní postupy výroby kloubních náhrad a jiných součástí určených pro zdravotnictví, které se prozatím v praxi nepoužívají.

Cílem této práce je vytvořit literární rešerši, která popisuje technologický postup výroby odlitků metodou technologie vytavitelného modelu včetně nejmodernějších používaných technologií a její výhody oproti jiným metodám výroby součástí.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1]BEELEY, PR. and SMART, RF. *Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press*, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
- [2]DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., aj. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
- [3]HORÁČEK, Milan *Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu* Brno : Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2010-05-23].
- [4]HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. Praha : Ústav strojírenské technologie ČVUT Praha, 2009 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW:  
<<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
- [5]Technologie pro povrchové úpravy. *MM* [online]. 25.dubna 2007, 4, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/galvanoplasticka-vyroba-forem>>.
- [6]SABAU, A. ; VISWANATHAN , S. . Material Properties for Predicting Wax Pattern Dimensions in Investment Casting. *Investment Casting Institute 48th Annual Technical Meeting 2000*. 2000, 1.
- [7]*Investment Casting Wax* [online].Blayson, 2010 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/>>.
- [8]HANDCOCK, Phil. *Wax Testing... Now and the Future, EICF Conference* [online].Blayson, 2010 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl19.pdf>>.
- [9]BOND, David. *Development of Stable Filled Wax* [online].Blayson, 2009 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl18.pdf>>.
- [10]BOND, Dave. *New Developments in Pattern Wax Technology* [online].Blayson, 2008 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl16.pdf>>.
- [11]GEBELIN, Jean-Christophe; CENRDOVICZ, Aleksanden M.; JOLLY, Mark R. Modeling of the wax injection process for the investment casting process. *CSIRO* [online]. 2003, 1, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.flow3d.com/pdfs/tp/cast\\_tp/FloSci-Bib32-03.pdf](http://www.flow3d.com/pdfs/tp/cast_tp/FloSci-Bib32-03.pdf)>.
- [12]*Bikundo* [online]. 2006 [cit. 2010-05-23]. Bikundo. Dostupné z WWW:  
<[http://www.bikundo.com/photo\\_stock/191424.gif](http://www.bikundo.com/photo_stock/191424.gif)>.

- [13] SWENSON, L. IMPROVING INVESTMENT CASTING THROUGH INNOVATIONS. *Modern Casting* [online]. 2002, 3, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.afslibrary.com/Home/Results/Detail/tabid/55/Default.aspx?ArticleId=32125>>.
- [14] CARTY, W.M., et al. The Development of an Improved Ceramic Shell for Investment Casting. *AFS Transactions 2009* [online]. 2009, 117, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.afslibrary.com/Home/Results/Detail/tabid/55/Default.aspx?ArticleId=38479>>.
- [15] *INVESTACAST* [online]. 2009 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.citace.com/generator.php?druh=7&ukol=1>>.
- [16] BUNDY, J.; VISWANATHAN, S. Characterization of Zircon-Based Slurries for Investment Casting. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2009, 1, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.afslibrary.com/Home/Results/Detail/tabid/55/Default.aspx?ArticleId=38259>>.
- [17] YUAN, C.; JONES, S.; WHITEY, P.A. DEVELOPMENT OF STABLE ALUMINA SLURRY SYSTEMS FOR INVESTMENT CASTING. *BICTA* [online]. 2002, 5, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.afslibrary.com/Home/Results/Detail/tabid/55/Default.aspx?ArticleId=34694>>.
- [18] SCALE, Mill, et al. *Investment casting slurry composition and method of use*. *AFS* [online]. 2004, -, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.freepatentsonline.com/7128129.html>>.
- [19] KANG, S., et al. Grain Refinement of Ni-base Superalloy INCONEL718 in Investment Casting. *Proceedings of the 1st Korea-Japan Conference for Young Foundry Engineers* [online]. 2010, 1, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.afslibrary.com/Home/Results/Detail/tabid/55/Default.aspx?ArticleId=296>>.
- [20] SNOW, J.D.; SCOTT, D.H. COMPARING FUSED SILICA AND ALUMINO-SILICATE INVESTMENT REFRACTORIES. *Modern Casting* [online]. 2001, 3, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.afslibrary.com/Home/Results/Detail/tabid/55/Default.aspx?ArticleId=31689>>.
- [21] BRUM, Fábio J. B., et al. Microwave dewaxing applied to the investment casting process. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2009, 7, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW:

<[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6TGJ-4T2M5VH-3&\\_user=10&\\_coverDate=04%2F01%2F2009&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=search&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_searchStrId=1344190221&\\_rerunOrigin=google&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=5bb8638b1ebbd1682b09f869d034504](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TGJ-4T2M5VH-3&_user=10&_coverDate=04%2F01%2F2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1344190221&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=5bb8638b1ebbd1682b09f869d034504)>.

[22] CHANDLEY, G.D. COUNTER GRAVITY CASTING OF ALUMINUM IN INVESTMENT AND SAND MOLDS. *Trans American Foundrymen's Society* [online]. 1996, 94, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.afslibrary.com/Home/Results/Detail/tabid/55/Default.aspx?ArticleId=30645>>.

[23] SHENDYE, S.B.; GILLES, D.J. Counter-Gravity Investment Casting Processes. *AFS Transactions 2009* [online]. 2009, 117, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.afslibrary.com/Home/Results/Detail/tabid/55/Default.aspx?ArticleId=38471>>.

[24] *Eyan Machine Tools Co., Ltd.* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. Allproducts. Dostupné z WWW: <<http://www.allproducts.com/machine/eyan/Product-200921116417-l.jpg>>.

[25] *S.A.F. Praha* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. [www.saf.cz](http://www.saf.cz). Dostupné z WWW: <<http://www.saf.cz/images/web/box-specialni-7.jpg>>.

[26] BELL, A.W. *Bell Machinery P/L* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. [www.bellmachinery.com](http://www.bellmachinery.com). Dostupné z WWW: <<http://www.bellmachinery.com/Grinding%20Information.pdf>>.

[27] NOVOTNÁ, Eva Základy tepelného zpracování. In *Základy tepelného zpracování* [online]. Brno : Ústav materiálového inženýrství, FSI VUT Brno, 2008 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM-FS/BUM-PF4.rar>>.

[28] *Wikipedia* [online]. 2009 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Atomov%C3%A1\\_absorp%C4%8Dn%C3%AAD\\_spektrometrie](http://cs.wikipedia.org/wiki/Atomov%C3%A1_absorp%C4%8Dn%C3%AAD_spektrometrie)>.

[29] *Metalografie I. - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem* [online]. 2005 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <[http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_metalografie\\_1/teorie.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm)>.

[30] LUDVÍK, Jan; LUDVÍK, Štěpán; BÍLEK, Karel. *Zkoušky tvrdosti* [online]. Kladno : Metrotest Kladno, 2002 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <[http://www.metrotest.cz/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.metrotest.cz/zkousky_tvrlosti.pdf)>.

- [31] *Wikipédia* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka\\_tvrdosti\\_podle\\_Vickerse](http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Vickerse)>.
- [32] *Kontrola rentgenem* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. NDT servis. Dostupné z WWW: <<http://www.ndtservis.cz/cz/ndt-rt.html>>.
- [33] *Prozařování odlitků rentgenem* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. TESTIMA. Dostupné z WWW: <<http://www.testima.eu/prilohy/190/Brano.jpg>>.
- [34] *Ultrazvuková metoda* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. NDT servis. Dostupné z WWW: <<http://www.ndtservis.cz/cz/ndt-ut.html>>.
- [35] *Ultrazvukové zkoušky* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. TRIANGOLO. Dostupné z WWW: <<http://www.triangolo.cz/uv-zkousky/ultrazvukova-zkouska-meric.jpg>>.
- [36] *Kapilární zkoušky* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. NDT servis. Dostupné z WWW: <<http://www.ndtservis.cz/cz/ndt-pt.html>>.
- [37] *Kapilární metody zkoušení* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. TEDIKO. Dostupné z WWW: <<http://www.tediko.cz/obr/WebPTprovoz2.jpg>>.
- [38] *Magnetické zkoušení* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. NDT servis. Dostupné z WWW: <<http://www.ndtservis.cz/cz/ndt-mt.html>>.
- [39] *Princip Magnetického zkoušení* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. ČSVE. Dostupné z WWW: <[http://www.csve.cz/img/wysiwyg/image/Sto%C5%BE%C3%A1ry%20tE/O\\_MT.jpg](http://www.csve.cz/img/wysiwyg/image/Sto%C5%BE%C3%A1ry%20tE/O_MT.jpg)>.
- [40] *Metoda výřivých proudů* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. NDT servis. Dostupné z WWW: <<http://www.ndtservis.cz/cz/ndt-et.html>>.
- [41] *Letecké odlitky* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. ALUCAST. Dostupné z WWW: <<http://www.alucast.cz/foto/aplikace-odlitku-letecky-prumysl01.jpg>>.
- [42] *Motor Chevrolet 427 ZL-1 Big Block V8* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. General Motors. Dostupné z WWW: <<http://media.novinky.cz/910/109106-original-afwdx.jpg>>.
- [43] *Golden Bear BC02 wedge* [online]. 2010 [cit. 2010-05-23]. NIKLAUS. Dostupné z WWW: <[http://www.nicklaus.cz/products/71/dthumb/71\\_1.jpg](http://www.nicklaus.cz/products/71/dthumb/71_1.jpg)>.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr.1 - Hlava Ramsese II. – 1292-1225 let před Kristem[ 1]
- Obr.2 - Zalévání matečného modelu do sádry [3]
- Obr.3 - Forma z nízkotavitelných slitin [3]
- Obr.4 - Výroba formy metalizací [3]
- Obr.5 - Výroba formy pomocí galvanoplastiky [3]
- Obr.6 - Forma vyrobená obráběním i s modelem [4]
- Obr.7 - Schéma výroby modelu [3]
- Obr.8 - Diagram závislosti teploty na roztažnosti [3]
- Obr.9 - Ukázky voskových modelů [7]
- Obr.10 - Schéma vstřikolisu [3]
- Obr.11 - Vstřikolis [12]
- Obr.12 - Stromeček
- Obr.13 - Namáčení v keramické břečce [3]
- Obr.14 - Sprchový posyp keramickým ostřivem [3]
- Obr.15 - Obalovací robot [15]
- Obr.16 - Vytavování vosku [3]
- Obr.17 - Působení tepelné roztažnosti a vznik dilatační spáry [3]
- Obr.18 - Bojlerkláv [3]
- Obr.19 - Proces regenerace vosku [3]
- Obr.20 - Postup při žihání keramické skořepiny [3]
- Obr.21 - Gravitační odlévání [3]
- Obr.22 - Sklopné lití [3]
- Obr.23 - Vakuové gravitační lití [3]
- Obr.24 - Vakuové nasávání [3]
- Obr.25 - Vytloukání
- Obr.26 - Třecí pila [24]
- Obr.27 - Tlakové tryskací zařízení [25]
- Obr.28 - Příklad na rychlé broušení [26]
- Obr.29 - Normalizační žihání [27]
- Obr.30 - Žihání k odstranění pnutí [27]
- Obr.31 - Rozpouštěcí ohřev kovu [27]
- Obr.32 - Příklad stárnutí hliníkové slitiny [27]
- Obr.33 - Postup při metalografii [29]
- Obr.34 - Zkouška tvrdosti podle Vickerse [31]
- Obr.35 - Rentgenová komora [33]
- Obr.36 - Kontrola ultrazvukem [35]
- Obr.37 - Kapilární metoda zkoušení [37]
- Obr.38 - Princip magnetického zkoušení [39]
- Obr. 39a, b – a/ Monokrystal b/ Usměrněné krystaly [1]
- Obr.39 - Využití odlitků v letectví [41]
- Obr.40 - Odlitek bloku motoru [42]
- Obr.41 - Odlitky pro zbrojní průmysl [3]
- Obr.42 - Kloubní náhrady [3]
- Obr.43 - Odlitek golfové hole [43]