

NETISKNOUT!

Titulní list

NETISKNOUT!  
Zadání

NETISKNOUT!

Licenční smlouva - oboustranně

**ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá problémem technologií vytavování voskového modelu spojených s výrobou přesných odlitků (technologie “ztraceného vosku”). Na základě literární studie byla vytvořena rešerše zaměřená na nejmodernější zařízení a technologie v oblasti vytavování voskového modelu. Práce také zahrnuje dokončovací operace a recyklaci voskových směsí.

**Klíčová slova**

Keramická forma, vosk, vytavování, odlévání

**ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the problem of de-waxing technologies connected with the production of investment castings (“lost wax” technology). Based on the study of the latest literature the most modern techniques of de-waxing are describe in this thesis. In the work is also mentioned recycling and reconstituting of the used waxes.

**Key words**

Ceramic shell, wax, de-wax, investment casting

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Šmíd, Michal. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti – vytavování vosků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. s. 35. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

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

28. 05. 2010

.....  
Michal Šmíd

**PODĚKOVÁNÍ**

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

**OBSAH**

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Abstrakt .....                                           | 4  |
| Prohlášení.....                                          | 5  |
| Poděkování.....                                          | 6  |
| Obsah .....                                              | 7  |
| Úvod .....                                               | 8  |
| 1 Technologie přesného lití.....                         | 9  |
| 1.1 Historie přesného lití .....                         | 10 |
| 2 Popis procesu vytavování voskového modelu .....        | 12 |
| 3 Způsob vytavování vosku ze skořepiny.....              | 13 |
| 3.1 Vznik dilatační spáry .....                          | 13 |
| 3.2 Technologie vytavování voskových modelů.....         | 14 |
| 3.2.1 Vytavování za vysoké teploty .....                 | 14 |
| 3.2.2 Vytavování za nízké teploty .....                  | 15 |
| 3.2.3 Vytavování dielektrickým ohřevem .....             | 15 |
| 3.2.4 Vytavování horkým vzduchem.....                    | 15 |
| 3.2.5 Vytavování v autoklávu.....                        | 16 |
| 3.2.6 Vytavování žíháním (Flash fire dewax system) ..... | 19 |
| 3.2.7 Mikrovlnné vytavování .....                        | 23 |
| 4 Možné vady vzniklé při vytavování.....                 | 25 |
| 5 Žíhání keramických skořepin .....                      | 26 |
| 6 Regenerace a rekonstituce vosků .....                  | 28 |
| 6.1 Recyklace vosků a jejich zpracování .....            | 28 |
| 6.1.1 Regenerované vosky .....                           | 28 |
| 6.1.2 Rekonstituované vosky .....                        | 30 |
| 6.2 Kontrola kvality voskové směsi pro regeneraci .....  | 31 |
| Závěr .....                                              | 33 |
| Seznam použitých zdrojů .....                            | 35 |

## ÚVOD

V dnešní době vyspělých a moderních technologií jsou kladeny čím dále větší nároky na výrobky, a to jak na jejich funkčnost, tak i na přesnost, odolnost, velikost a pořizovací náklady. Někde jsou kladeny nároky spíše na objem výrobku, nebo v jiných případech na povrch výrobku. Ve slévárenství je hlavním cílem především výroba odlitků téměř na hotovo, tzn. bez nutnosti dalších dokončovacích operací.

Tato práce se zabývá a popisuje technologii přesného lití pomocí vytavitelného modelu. Nejprve se zabývá podstatou přesného lití a popisem jednotlivých technologických operací od výroby voskového modelu a keramické formy až po odlití odlitku.

Hlavní část práce se zabývá podstatou vytavování voskového modelu z formy, vznikem tepelného šoku při vytavování nutného pro vytavení vosku bez porušení formy. Dále se postupně rozeberou jednotlivé technologické metody vytavování vosku z forem s důrazem na dvě nejpoužívanější současné metody ve slévárenství. Další kapitoly jsou zaměřeny na vady forem a jejich vznik, poté se zaměří na žíhání forem pro odstranění zbytkového vosku a předehřátí forem před odléváním kovu do formy.

Poslední část práce se věnuje recyklaci slévárenských vosků po jejich vytavení z keramických forem, popíše regeneraci a rekonstituci slévárenských vosků, jejich vlastnosti po recyklaci a následné zpětné použití ve slévárnách.

## 1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ

Výroba odlitků technologií vytavitelného modelu zaujímá jedno z předních míst mezi jinými moderními slévárenskými technologiemi. Tato technologie se během několika desítek let vysoce rozšířila díky reflektujícím požadavkům jak na odlitky tvarově a rozměrově přesné, tak i materiálově náročné. Cílem slévačů je stále častěji výroba odlitků „near net shape“ („téměř na hotovo“), tzn. bez nutnosti dalších dokončujících operací. Jedná se o metodu vedoucí k přímé, efektivní a ekonomické výrobě konečné součásti. V dnešní době je nutné při výrobě součásti splňovat vyšší nároky na jakost a kvalitu, rozměrovou přesnost a funkční parametry odlitku s ohledem na vysokou efektivitu výroby a co nejnižší výrobní náklady. U některých strojírenských součástí se musí stále uplatňovat progresivní výrobní způsoby strojírenské metalurgie, které jsou schopny uведенé požadavky splňovat. Mezi progresivní způsoby lze zařadit také přesné lití vytavitelným modelem, jenž při efektivním uplatnění umožňuje podstatné úspory materiálu a snižuje použití dokončovacích výrobních operací. [1]

## 1.1 Historie přesného lití

Od počátku starověké civilizace byla známa technologie výroby uměleckých předmětů, zbraní a šperků pomocí lití ztraceného včelího vosku. Archeologické průzkumy a dochované malby a písemnosti dokazují, že už před 6000 lety př.n.l. lidé ovládali dovednosti v inženýrství a metalurgii zahrnující znalosti a dovednosti pro výrobu zlatých a měděných artefaktů vyrobených metodou ztraceného vosku. Nejstarší místo podle archeologických objevů, kde se tato technologie objevila, je Mezopotámie přibližně 4000-3000 př.n.l. a postupně se tato znalost technologie rozšiřovala do Indie, Řecka, Anatólie, Egypta a později i do Číny a ostatních asijských zemí. Během staletí se tato metoda úplně rozšířila a postupně zdokonalovala. Teprve kolem roku 1900 se tento proces manufakturoval. Hlavní rozvoj nastal v období 2. světové války s potřebou vývinu nových technologií na výrobu pro válečné potřeby a od roku 1950 nastal největší rozmach, kdy se tato metoda začala nejvíce rozvíjet a zdokonalovat. V současnosti je největším světovým výrobcem přesných odlitků USA, v Evropě jsou největší producenti Velká Británie, Francie a Německo a v Asii Japonsko a Čína. Česká Republika byla vždy považována za jednu ze zemí s vyspělým strojním a slévárenským průmyslem. I když je v současnosti produkce v oblasti přesného lití v České Republice v celosvětovém měřítku zanedbatelná, v přepočtu na jednoho obyvatele se můžeme rovnat s nejvyspělejšími zeměmi. [2]



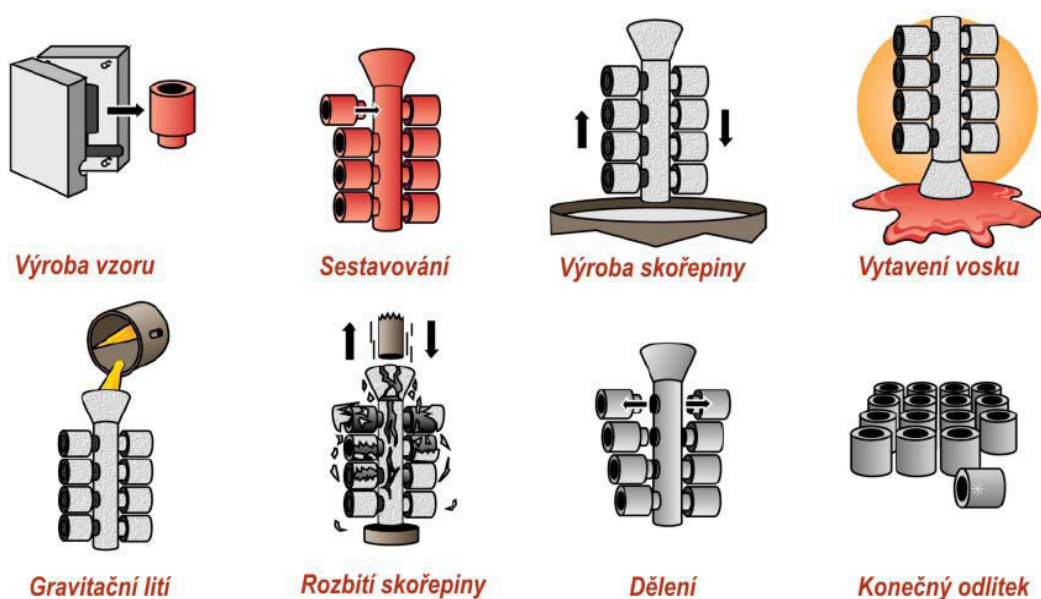
**Obr. 1.** Bronzová hlava (Benin, 12. st. n. l.), zvolena jako symbol britské společnosti pro přesné lití.) [2]



**Obr. 2** Odlitek hřebenu ze zlata (oblast Dněpru, 4. stol. n.l.) [2]

## 2 POPIS PROCESU VYTAVOVÁNÍ VOSKOVÉHO MODELU

Po vytvoření poslední vrstvy obalu keramické skořepiny a po jejím dokonalém vysušení se musí z vnitřku skořepiny odstranit voskový model. K vytavení voskového modelu se používá mnoho nejrozličnějších metod, nejčastěji je používána přehřátá pára v parních autoklávech. Během této části procesu je možné zjistit vzniklé vady na keramické skořepině, nejčastěji praskliny, protože vosk má schopnost detekovat tyto chyby, neboť prosákne skrz formu a díky tmavší barvě vosku se zobrazí jako skvrna na povrchu formy v místě praskliny. Hlavní činitel v této části procesu je rozdílná roztažnost keramiky a vosku. Vosk má mnohonásobně větší tepelnou roztažnost než keramická skořepina. Proto musí být proces vytavování vosku rychlý kvůli zamezení rozměrové dilataci modelu, která by způsobila praskání keramických skořepin. Po vytavení vosku ze skořepiny je nutné skořepinu vysušit a následně vyžít. Žíháním se odstraní zbytky vosku a jiných nečistot a forma je schopna odolávat vysokým teplotám. V poslední fázi dochází ke konečné kontrole skořepiny, očištění, zaizolování a po předeřtání je forma připravena k odlévání. Následně po odlití do formy, ztuhnutí a vychlazení se skořepina odstraní od odlitku tryskáním nebo otřesením. Omíláním v bubnech nebo tryskáním odlitku se oddělí poslední zbytky skořepiny. Konečné odlitky poté dostaneme oddělením od vtokového kůlu. [3]



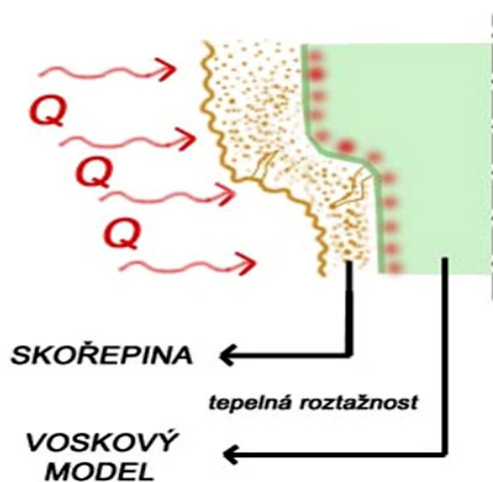
Obr. 3. Jednotlivé části procesu [3]

### 3 ZPŮSOB VYTAVOVÁNÍ VOSKU ZE SKOŘEPINY

Vytavení voskového modelu ze skořepiny je možné několika způsoby. U všech je ale nutné brát v úvahu základní problém, což je rozdílná roztažnost vosku a skořepiny. Díky větší roztažnosti vosku při zahřátí je velké nebezpečí roztržení skořepiny a tím její úplná deformace při vytavování. Proto je nutné při procesu vytavování vytvoření dilatační spáry na povrchu voskového modelu. Toho docílíme rychlým ohřevem této vrstvy neboli aplikací „tepelného šoku“. [4]

#### 3.1 Vznik dilatační spáry

Dilatační spára vznikne odtavením tenké povrchové vrstvy vosku, která je v přímém styku s povrchem skořepiny. Abychom toho docílili, je nutné co nejrychleji převést teplo skrz skořepinu k této vrstvě vosku. Kontaktní vrstva vosku se ve skořepině roztaví dříve než zbylý objem vosku. Toto rychlé natavení se nazývá tepelný šok a mělo by k němu dojít po celé ploše skořepiny. Účinkem tepelného šoku se tato kontaktní vrstva vosku odtaví a vznikne tak malý volný prostor pro rozpínající se vosk. Pokud by nedošlo k tepelnému šoku a vytvoření dilatační spáry, pak by tepelná roztažnost vosku mohla způsobit praskání skořepin. Tepelná vodivost modelového materiálu (vosku) musí být nízká, jinak by došlo k natavení většího objemu než je kontaktní plocha se skořepinou a došlo by tak k rychlému rozpínání vosku a deformaci formy. [4]



Obr. 4. Aplikace tepelného šoku při vytavování [4]

Dalším vlivem je druh voskového modelu a viskozita voskové směsi. Každý typ vosku má různou viskozitu, která má vliv i na teplotu tavení. Tavicí oblast pro všechny vosky je v rozsahu od 50 do 90 °C. Některé vosky mají prudký bod tavení, zatímco jiné mají kašovitě stupně s vyšší viskozitou. Vysoká viskozita způsobuje problémy při odtavování z dilatační spáry. Je dokázáno, že plněné vosky s vyšší viskozitou vytváří více prasklých forem než neplněné vosky. [2]

### 3.2 Technologie vytavování voskových modelů

V současné době existuje několik způsobů, jak vytavit voskový model ze skořepiny. V současnosti se však ve většině sléváren používají dvě metody vytavování, které nahradily většinu ostatních technologií díky nízkým nákladům na výrobu a nízkým časům zpracování. Tyto dvě nejvýznamnější technologie jsou - vytavování přehřátou parou v autoklávu od firmy LBBC a druhou technologií je vytavování vyžíráním (Flash fire dewax system) od firmy Pacific Kilns. Ostatní technologie vytavování jsou už mnohdy zastaralé a používají se už jen v malém procentu sléváren.

#### Rozdělení technologií vytavování:

- Za vysoké teploty
- Za nízké teploty
- V autoklávu
- Vytavování žíráním (Flash fire dewax system)
- Dielektrickým ohřevem
- Horkým vzduchem
- Mikrovlnné vytavování

#### 3.2.1 Vytavování za vysoké teploty

Vytavování vosku obvykle probíhá ve vyhřáté peci při teplotě okolo 750 °C. Pracovní teplota pece se pohybuje při teplotách od 900 až 1100 °C. Vytavování a vypalování trvá 10 až 15 minut. Tento způsob vytavování spojuje vytavení vosku s vypálením keramické skořepiny.

Nevýhodou tohoto procesu jsou vysoké ztráty vosku až 15% a také částečné znehodnocení voskové směsi. Výhodou tohoto procesu je rychlé vytavení vosku při minimálním praskání formy díky vytvoření tepelného šoku na povrchu voskového modelu (dilatační spára), což zabraňuje deformaci skořepiny vzniklé roztažností vosku a zlepšuje jeho odvod. [5]

### **3.2.2 Vytavování za nízké teploty**

Vytavování za nízké teploty se dá provést několika způsoby:

- V roztavené a přehřáté hmotě o stejném složení jako modelová hmota ohřátá na teplotu dvakrát vyšší než je její teplota tavení. Doba vytavování je 10 až 15 minut.
- V lázni nízkotavitelných slitin jako jsou cín, olovo, bismut, antimon.
- Ve vroucí vodě
  - vytavený vosk plave na hladině. Vytavování probíhá 10 až 20 minut, záleží na tvaru a složitosti formy. Výhodou procesu je, že do skořepiny se vsákne pouze nepatrné množství vosku. Vsáklá voda do skořepiny začne postupně odtavovat vosk – vytvoří se dilatační spára, která brání tlaku narůstajícího modelu. Rychlost odtavování vosku je větší než rychlost narůstání dilatace. Pokud by se obalené stromečky ponořili do vody o nižší teplotě než je bod tavení vosku, povrchová vrstva modelu se neodtaví a skořepina se potrhá expanzí vosku. [5]

### **3.2.3 Vytavování dielektrickým ohřevem**

V tomto procesu se skořepiny zvlhčí vodou a následně se umístí do pole vysokofrekvenčních oscilací. Oscilace způsobí, že se navlhčená skořepina rychleji ohřeje, kontaktní vosk se skořepinou se odtaví a vytvořením dilatační spáry se zabrání prasknutím skořepiny rozpínajícím se voskovým modelem. [5]

### **3.2.4 Vytavování horkým vzduchem**

U tohoto způsobu vytavování probíhá na rozdíl od ostatních procesů odtavování vosku z vnitřku. Proud horkého vzduchu se zavede do středu

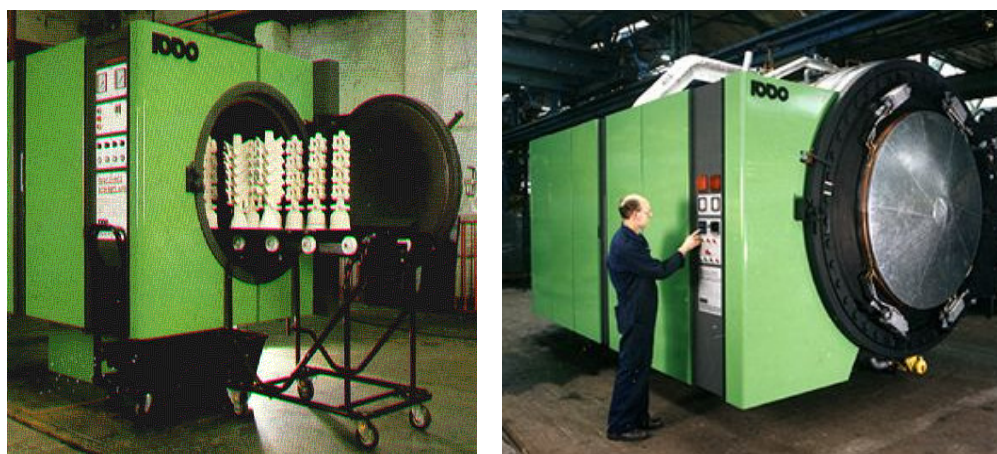
vtokového kůlu voskového stromečku. Vtokový kůl se protaví dříve než se celý model prohřeje a k odtavování dochází z vnitřku. Tím, že vosk ubývá zevnitř, vznikají menší dilatační tlaky vosku na skořepinu a dochází k menšímu výskytu porušení keramických skořepin. [5]

### **3.2.5 Vytavování v autoklávu**

Vytavování vosku v autoklávu je nejrozšířenější metodou ve slévárnách. Proces vytavení probíhá tepelným šokem v syté vodní páře ve velké tlakové nádobě. Teplota páry závisí na jejím tlaku, proto je pracovní tlak v nádobě od 0,3 do 0,6 MPa při teplotě páry od 135 do 165°C. Proces vytavení probíhá 5 až 25 minut podle tvaru a složitosti formy. Do autoklávu se skořepiny umísťují hrdlem dolů, aby z nich mohl vosk volně vytékat. Následně se vytavený vosk zachycuje ve sběrné nádobě, odkud se odvádí na regeneraci. [5]

Autokláv zahrnuje mnoho výhod. Vytavování v autoklávu je poměrně rychlé a výkonné, má vysokou účinnost vytavování a velmi nízké ztráty vosku. Má poměrně nízké provozní náklady, obsluha je velice jednoduchá a je možné společně vytavit různé velikosti skořepin. Vysoká rychlost přenosu tepla k voskovému modelu skrze formu vytvoří tepelný náraz a následně dilatační spáru, čímž se minimalizuje praskání skořepin.

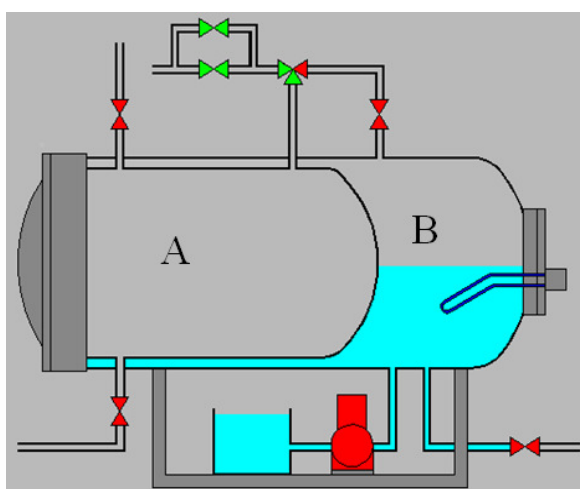
Spojením autoklávu (autoclave) a vyvíječe páry (boiler) do jednoho celku vznikl bojlerkláv.



Obr. 5. a 6. Systém boilerkláv od firmy LBBC [6]

Boilerkláv je plášťový jednodveřový autokláv, kde plášť byl rozšířen tak, že současně zahrnuje vyvíječ páry (boiler), který je elektricky vyhříván. Po zapnutí plnicího čerpadla se začne boilerkláv plnit vodou. Úroveň hladiny vody v plnicím zásobníku je řízena prostřednictvím jednoduché plovoucí koule. K řízení úrovně hladiny v boileru je určena speciální sonda. Plnění sekce boileru trvá přibližně 1 až 1,5 hodiny, čerpadlem o výkonu 450 litrů za hodinu. Uvnitř jsou umístěny ohřívací elementy, které jsou řízeny pracovním tlakem. Když je dosaženo pracovního tlaku, ohřívací elementy se vypnou/zapnou dle nastavených rozdílů přibližně na hodnotě 0.3 atm. Plnicí čerpadlo je řízeno automaticky. Jestliže čerpadlo selže a pára se stále vyvíjí, pak se ohřívací elementy vypnou při poklesu hladiny vody pod řídicí sondu. Při cyklickém provozu zařízení je voda automaticky doplňována při indikaci její nízké úrovně. To se děje prakticky po každém čtvrtém cyklu – doplnění o asi 45 až 55 litrů. Jestliže selže vypnutí ohříváčů a pára se dále vyvíjí, pak nastane přehřátí termostatu, čímž se vypne přívod elektrické energie. Sekce autoklávu je užívána k vytavování vosku ze skořepinových forem. Důležité jsou fáze zavezení stromečků do autoklávu, zavření dveří a přivedení páry tak rychle, aby vosk nestačil svou expanzí narušit keramickou formu. Formy pro vytavení jsou naloženy na paletu, vozík a paleta jsou pak zavezeny do autoklávu. Všechny modely jsou konstruovány tak, že optimálního pracovního tlaku 9 atm je dosaženo do 10 min.

Bojlerkláv má výborné provozní vlastnosti. Dosahuje velmi rychlého natlakování – 7 atm za 3 až 4 sekundy. Díky rychlému natlakování zajistí, že teplota vosku na rozhraní skořepina/vosk dosáhne velmi rychle 60 °C, takže vytvořením dilatační spáry se zamezí trhání skořepiny. Provozní tlak bojlerklávu je přibližně 9 atm, čemuž odpovídá teplota okolo 180 °C. To vede k většímu objemu vytaveného vosku, takže zůstává méně zbylého vosku ve skořepině, který se musí vypálit až při žihání skořepiny. Vytavený vosk je sbírán a přečerpáván do oddělené nádržky pro následnou regeneraci.



Obr. 7. Schéma bojlerklávu [6]

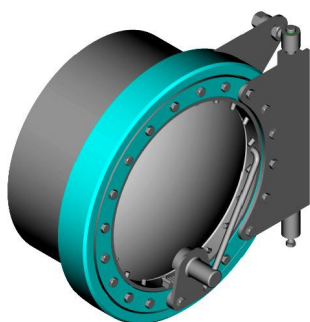
- pára se generuje v zadní části B bojlerklávu
- přehřátá pára přechází přímo z komory B do vytavovací komory A
- pokles tlaku v zadní části B generuje více páry
- Formy jsou obklopeny v horkém vzduchu během 4 vteřin

Největšími výhodami systému jsou konzistentní rychlost natlakování a řízená rychlost snižování tlaku. Jak už bylo řečeno, rychlost natlakování bojlerklávu na provozní tlak 6 atm dosáhne za 5 sekund.

Rychlost snižování tlaku byla vždy považována za bezvýznamnou, ale výzkumy dokázali, že i tento faktor ovlivňuje vznik trhlin skořepin. Příliš rychlý pokles tlaku je nebezpečný. Důvodem jsou vzduchové kapsy ve skořepině vzniklé v průběhu obalování. Do nich proniká pára v průběhu nárůstu tlaku a výdrže tlaku – dojde k vyrovnaní tlaku v kapse. Při rychlé dekompresi nestačí

takto uzavřený prostor reagovat na snížení tlaku v okolí a tím může dojít až ke vzniku trhlin. Nejvíce to platí u vodou rozpustných pojivových systémů.

Technickým přínosem u boilerklávu je systém „QuickLock Door“ patentovaný firmou LBBC. Je to rychle uzavírající dveřový mechanismus, který umožňuje rychlou a snadnou manipulaci při otvírání a zavírání boilerklávu a zaručuje stoprocentní nepropustnost. Jednoduchost a rychlost manipulace při uzavírání boilerklávu zajišťuje výkonnost procesu a maximální bezpečnost. Zlepšená funkce blokování umožňuje pracovat jak v tlaku, tak i ve vakuu.



8. Systém QuickLock Door [6]

Budoucnost ve vývoji boilerklávu je směřována k větší rychlosti natlakování ze 4 až 5 sekund na 2 až 3 sekundy a dále také k vývoji výkonnějšího systému ovládání celého procesu.

### **3.2.6 Vytavování žiháním (*Flash fire dewax system*)**

Vytavování voskových modelů žiháním lze zařadit do počátků přesného lití. Avšak nevýhodou tohoto procesu byl výskyt kouře při vytavování. Na počátku 60. let autokláv problém vyřešil a stal se standardem ve vytavování. Ale se zvětšujícími se skořepinami a nároky na vytavování se zvětšil zájem o vytavování vyžiháním (*Flash fire dewax*). Na počátku 90. let s nástupem technologie Rapid Prototyping se technologie vytavování žiháním stala nezbytnou součástí procesu a naplnila jeho potřeby.

Metodou technologie vytavování žiháním se zabývá americká firma Pacific Kilns. Tato firma se jediná zabývá konstrukcemi pecí pro vytavování a technologiemi s tímto spojenými. Od roku 1994 firma Pacific Kiln představila nový systém vytavování žiháním (*Flash fire dewax system*), který změnil

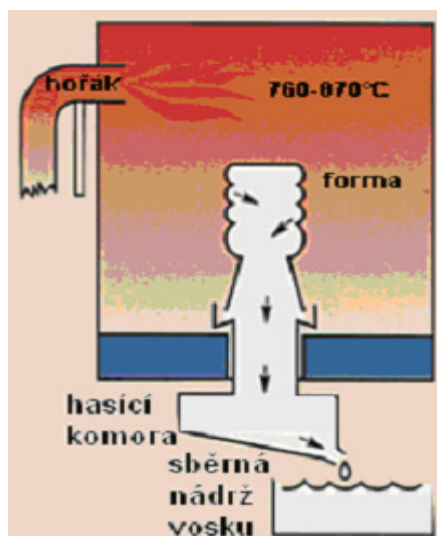
normy vytavování a stal se jedním z nejvýznamnějších systémů vytavování voskových modelů ze skořepin.

### **Postup vytavování žíháním**

Skořepinové formy se umístí na určená místa na nákladní lože vozíku. Obsluha pece poté aktivuje řízený proces, který otevře dveře pece, zatáhne naložený vozík dovnitř pece a zavře dveře.

Uvnitř pece probíhá vytavování žíháním za teplot od 760 °C do 870 °C, podle druhu pece. Teplo rychle proniká keramickým pláštěm, tím vzniká dilatační spára na povrchu mezi skořepinou a voskovým modelem, což eliminuje potenciální praskání skořepin v důsledku expanze vosku. Vytavený horký vosk odtéká přes trubice v podlaze do zásobníku, který je chráněn inertním plynem pro zamezení hoření vosku, odtud odtéká mimo do zásobní nádrže, kde je poté dále zpracován. Vosk je obvykle odstraněn během 10 minut a kompletní vypálení proběhne během 20 minut. Skořepiny poté mohou být ohřány na vyšší teplotu pro následné odlévání nebo mohou být odebrány pro kontrolu a poté znovu ohřány. Protože neexistuje žádný zbytkový vosk, dohřev pece nemusí mít přídavné spalování.

Při procesu žíhání vosku ze skořepin vzniká vysoce oxidovaná atmosféra, která se vypouští do komínové sekce, která je spojena s přídavným spalováním, které termálně degraduje uhlovodíkový kouř vzniklý při vytavování.



**Obr. 9.** Vytavování vosku ze skořepiny v žíhací peci [7]

**Výhody systému vytavování žíháním**

- Vytavování a vypálení jsou sloučeny do jednoho procesu
- Všechny skořepiny jsou zpracovány totožně s dokonalou opakovatelností
- Vosk nemusí být odeslán pro regenerační zpracování
- 80% až 90% vosku se regeneruje bez vlhkosti
- Nízké požadavky na údržbu
- Splňuje všechny ekologické požadavky
- Proces je zcela automatizovaný, přináší bezpečnost obsluhy
- Nízké náklady na energii, pec se udržuje při 870 °C a nevychyluje se do vyšších teplot

**Pece pro systém vytavování žíháním**

Každá pec je navrhována specificky podle požadavků sléváren nebo laboratoří. Pece se konstruuje podle velikosti skořepin a jejich množství, které má být zpracováno za den, dále podle množství vytavovaného vosku atd.

Firma Pacific Kiln vyrábí tři specifikace pecí:

- Pece nové generace
  - Jednodveřové pece
  - Dvoudveřové pece
  - Kontinuální pece
- Standardní pece
- Výtahové pece

**Pece nové generace**

- **Jednodveřové pece**

Tato pec s jednodílnými dveřmi a jednodílným nákladním vozíkem je nejúspornější pro malé slévárny nebo pro Rapid Prototype výzkumné laboratoře.

- **Dvoudveřové pece**

Splňuje vysoké nároky sléváren. Je vybavena dvoudílným nákladním vozíkem. Výhodou zde je, že náklad forem na jedné straně se může vytavovat, zatímco druhá část nákladního vozíku venku se vyloží a přeloží. Při větším množství forem je výrazná úspora času.

- **Kontinuální pece**

Používají se u velmi velkých operací s nepřetržitými dodávkami skořepin. Tyto kontinuální pece jsou schopné zpracovat 12 skořepin každých 12 minut. Pec má osm vozíků a uvnitř pece se nachází čtyři nezávisle kontrolované teplotní zóny. Podle potřeby však může být i více teplotních zón uvnitř pece. Systém je plně automatizovaný, takže vozíky automaticky putují celou pecí.

Kontinuální pece jsou jediný způsob jak zajistit, aby každá forma dostala po stejnou dobu teplotu a atmosférickou úpravu. Jak každá forma prochází tunelem, prochází stejným programem teplotních zón se stejným časovým úsekem ve stejné oksličené atmosféře.

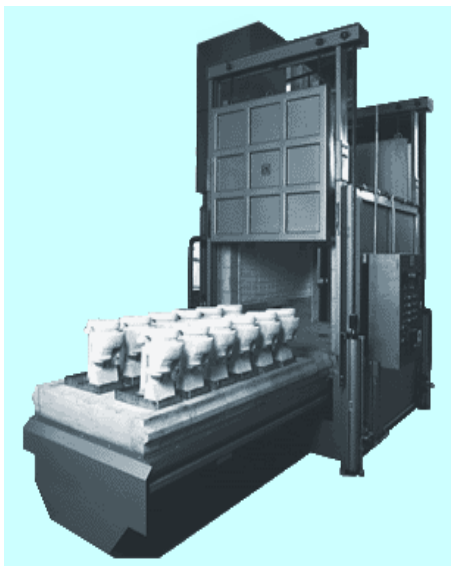
### **Standardní pece**

Standardní pec pro vytavování je ekonomická verze vytavovacího systému. Systém v sobě zahrnuje všechny patentované výhody původního Flash fire systému zavedeného v roce 1994 a technologie pro bezpečnost a spolehlivost, ale bez nákladných mechanismů vozíkových řízení. Standardní pece jsou určeny pro malé a střední slévárny přesného lití.

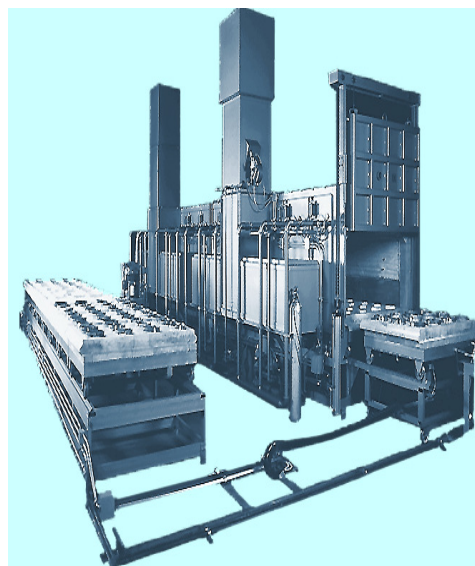
### **Výťahové pece**

Výťahová pec je řešením pro rozpočet slévárny, která chce nebo potřebuje vstoupit do vyšší úrovně řízení procesů ve vytavování, vypalování a předehřevu. Tato jednotka byla navržena s důrazem na flexibilitu a jednoduchost. Zatímco pec udržuje nastavenou teplotu, vloží se formy kamkoliv na nákladní rošt, stiskne se tlačítko a během několika vteřin jsou

skořepiny spuštěny do pece a začíná vytavování. Když je vytavovací /vypalovací proces kompletní, stiskne se tlačítko a rošt se skořepinami se spustí pro vyprázdnění a opětovné naložení pro další cyklus.



**Obr. 10.** Dvoudveřová pec [8]



**Obr. 11.** Kontinuální pec [8]

### **3.2.7 Mikrovlnné vytavování**

Mikrovlnné vytavování je novou technologickou alternativou v oblasti vytavování vosků. Tato metoda je však stále ve stádiu laboratorních pokusů, ale ukazuje se, že je vysoce účinná. K odparařování formy dochází velmi rychle, přibližně do dvou až pěti minut, a přitom se významně snižuje začlenění nečistot a vody, což je nevyhnutelné při vytavování v autoklávu.

Vytavování probíhá v mikrovlnné peci. Skořepiny se umístí uvnitř pece a vystaví se mikrovlnnému záření. Tato metoda zahrnuje začlenění „ztrátového“ materiálu, kterým je nejlépe uhlík nebo grafit, do struktury keramické formy při její výrobě. Tyto jemné částice při působení mikrovlnného záření o frekvencích mezi 300 až 30 000 MHz generují teplo a tím napomáhají při vytavování. Avšak přidáním příměsí do formy se mohou zhoršit její mechanické vlastnosti. [8]

Jelikož se používání mikrovlnných technologií stále zvyšuje, je jen otázkou času, kdy bude tato technologie hrát vedoucí úlohu v procesu odparafinování.

#### 4 MOŽNÉ VADY VZNIKLÉ PŘI VYTAVOVÁNÍ

Vznik trhlin u skořepin a jejich problematika je velmi často spojována pouze s procesem vytavování, což mnohdy není zcela pravdivé a příčiny musíme hledat jinde. Kromě nevytvoření dilatační spáry a tím vzniku možného prasknutí formy velkou tepelnou roztažností vosku nebo rychlým snížením tlaku v bojlerklávu mohou být příčiny trhlin skořepin i důsledkem jiných operací. [4]

Příčiny trhlin skořepin mohou být také:

- špatná geometrie odlitku – voskového stromečku
- dlouhé časy sušení mezi jednotlivým obalováním
- příliš mnoho obalů neboli příliš tlustá skořepina
- špatný primární obal omezující přestup tepla
- nadměrný obsah vzduchu ve struktuře skořepiny

## 5 ŽÍHÁNÍ KERAMICKÝCH SKOŘEPIN

Než se keramická forma pošle na odlévání, je nutné ji žíhat. Výsledkem žíhání je pak forma schopná odolávat vysokým teplotám. Při pečlivém výběru keramické břečky a posypového materiálu mohou být formy používány pro velmi širokou oblast slitin.

Existují tři hlavní důvody pro žíhání forem před odléváním:

- odstranění zbytků vosku a těkavých látek vzniklých vytavováním
- pro zhutnění struktury keramiky, což dodává skořepině potřebnou pevnost
- předejít formě před litím na danou teplotu

Je velmi důležité odstranění zbytků nečistot po procesu vytavování vosku. Uvnitř skořepiny se nacházejí zbytky vosku a spolu s ním i těkavé látky, které vznikají při vytavování. Těkavé látky se odstraní při teplotách menší jak 100 °C, avšak voda vázaná ve struktuře křemičitého pojiva nelze při tak nízké teplotě odstranit. K úplnému odstranění vody dochází při teplotě kolem 1000 °C. Pro dobré výsledky žíhání by měli být používány vosky lepší kvality a neměly by obsahovat více jak 0,1% zbytků popelovin. Je také důležité, aby byl při žíhání zajištěn dostatečný přísun kyslíku pro vypálení vosku, aby došlo k eliminaci vzniku karbonizovaného vosku.

Žíháním skořepiny se převede amorfnní forma vazné vrstvičky  $\text{SiO}_2$  na formu krystalickou a odstraní se všechny těkavé látky a zbytek vosku. Žíhací teploty bývají vyšší než 800 °C, obvykle od 900 do 1100 °C. Maximální teplota ohřevu skořepin se řídí charakterem použitých operací. Při teplotách menších jak 800 °C nedojde ke zhutnění struktury keramiky skořepiny a tím nejsou formy inertní vůči roztavenému kovu. U žíhání skořepin při teplotách kolem 1500 °C jsou formy používány při procesu usměrněného tuhnutí, při kterém musí být kov delší dobu v tekutém stavu. Žíhací teplota je omezena kolem 1550 °C, kdy se keramiky na bázi křemičitanů blíží teplotě tavení křemičitanu. Při odlévání kovů s nízkou teplotou tavení je naopak hranice žíhání do 850 °C,

kvůli omezení zvyšování pevnosti formy. Vysoká pevnost formy může zapříčinit trhliny a praskliny vznikající při smršťování odlitku. [9]

## 6 REGENERACE A REKONSTITUCE VOSKŮ

Ekologické a ekonomické požadavky nutí výrobce a spotřebitele voskových materiálů k recyklaci. Recyklace vosků není nová věc a regenerace zde již má své místo. Nejmodernější techniky a procesy umožňují plnou rekonstituci na vlastnosti panenského vosku. Úspory recyklace vosků mohou ve výrobě dosáhnout až 20% provozních nákladů. Recyklace je často nejvýhodnější způsob nakládání s použitými vosky, neboť poplatky na uložení odpadu na skládkách jsou obrovské a ne vždy je taková skládka dostupná. Protože ceny základního materiálu a také provozní náklady se stále zvyšují, bude nejspíše recyklace nezbytná pro všechny materiály.

Recyklace vosků existuje již dlouhou dobu často s jednoduchými regeneracemi prováděnými přímo ve slévárně. Jedná se především o odvodnění a základní filtraci. Existují však už specializované firmy, které vlastní moderní recyklační vybavení. Vývoj nových výhodných recyklačních technik dovoluje širší použití recyklovaného vosku. [10]

### 6.1 Recyklace vosků a jejich zpracování

Existují dva způsoby pro recyklaci použitých vosků, které dovolují slévárnám přesného lití učinit úspory z cen vosků bez újmy na kvalitě odlévání.

- Regenerace – recyklační techniky k rekultivaci pro použití vosku na vtoky
- Rekonstituce – speciální recyklační techniky k rekultivaci pro použití vosku na modely

#### 6.1.1 Regenerované vosky

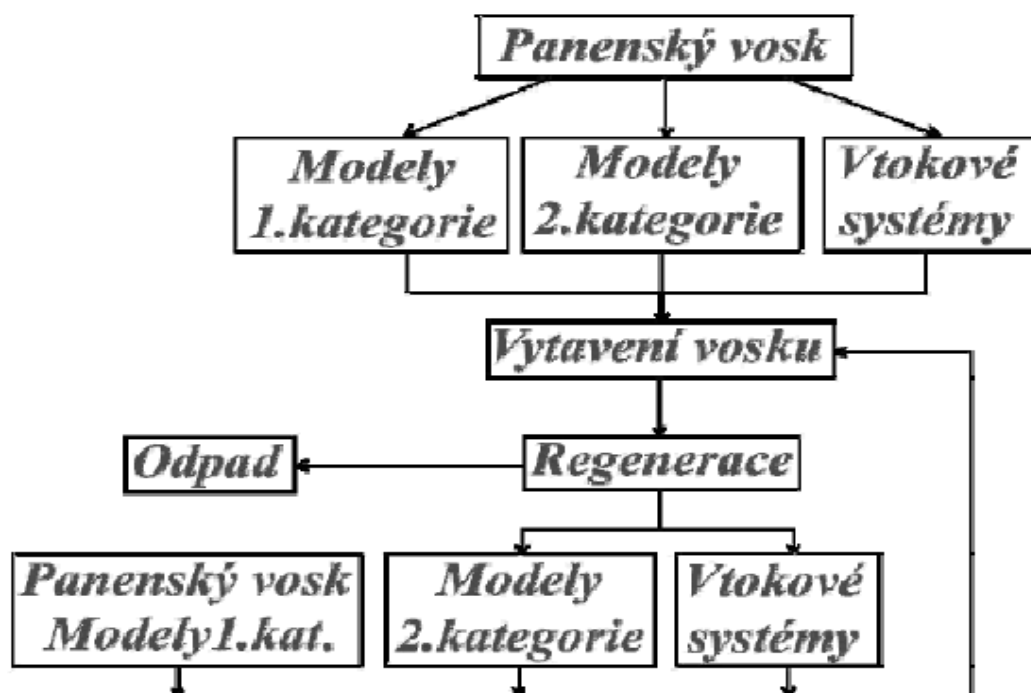
Jsou používány především na vtoky. Regenerované vosky jsou čisté a filtrované a mohou mít rozsah od jednoduchých regenerovaných vosků až po vosky s různými přísadami pro uspokojení specifických požadavků.

Firma Blayson, zabývající se regenerací vosků, obvykle doporučuje udržování plnicího materiálu ve finální formě, což dává mnoho výhod pro vosky na vtoky:

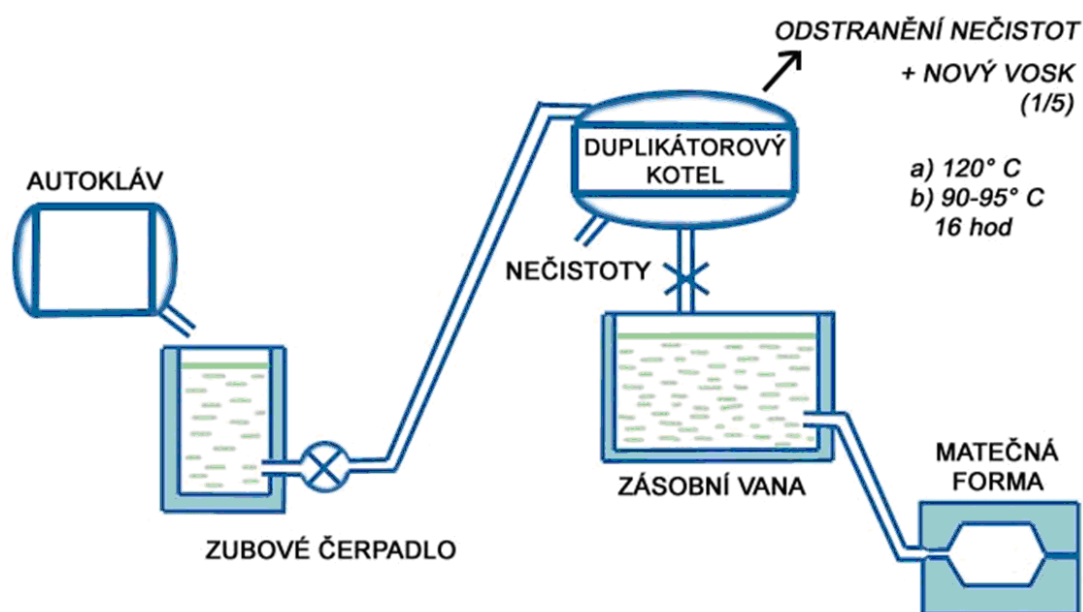
- Zlepšuje vstřikovací vlastnosti
- rychlejší tuhnutí
- stálější vosk s menším množstvím deformací
- redukce zapečenin/kavitace

#### Regenerace se provádí několika způsoby:

- **sedimentací** – vosk se roztaví a ponechá se v tekutém stavu. Voda, keramické nečistoty a plnivo se usadí na dně kvůli jejich větší hustotě. Po určité době se vosk odlije a znovu použije. Metoda je časově náročná a je nutné dodržet přesnost nastavení teploty, jinak dojde ke znehodnocení vosku.
- **filtrace** – využití filtračního lisu, kde je vosk přečerpán z autoklávu přes lis. Vosk teče přes filtrační textilií, kde se usadí plnivo, keramické zbytky a spaliny. Po zaplnění lisu je tok vosku přerušen, lis je otevřen a vyčištěn.
- **odstředivý způsob** – využívá se v případě vyššího obsahu plniva ve vosku. Vosk z autoklávu je přečerpán do vysokorychlostní centrifugy, kde se částice s vyšší hustotou oddělí. Avšak částice podobné hustoty ve vosku zůstávají a tím je zvýšen obsah popelovin. [10]



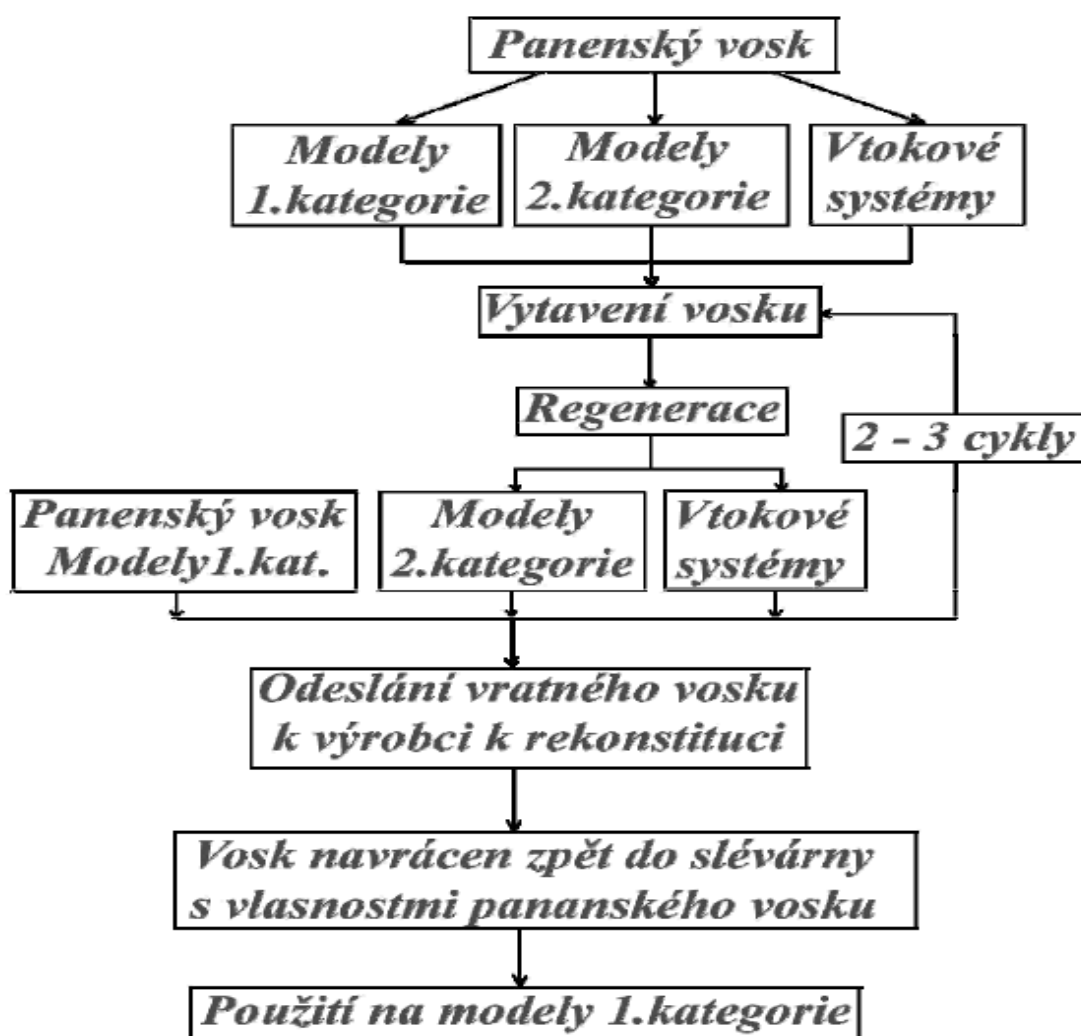
Obr. 12. Schéma regenerace vosků [10]



**Obr. 13.** Regenerace vosku po vytavení v autoklávu [6]

### 6.1.2 Rekonstituované vosky

Při rekonstituci je vytavený vosk z autoklávu nebo použitý vosk známého složení vyčištěn a filtrován a poté smíchán s novými panenskými materiály na dohodnutou specifikaci a následně vrácen zpět do slévárny k výrobě modelů. Výsledky rekonstituce jsou velmi dobré ve srovnání s vlastnostmi panenských materiálů. V porovnání s panenskými vosky nemají žádné významné zvýšení obsahu chemických látek ani popelovin, takže kompletní produkce voskových modelů může být pomocí rekonstituovaných vosků. Zásadní výhodou je, že cenové úspory použitím rekonstituovaného vosku jsou 30 až 35% a jsou dosažitelné bez ztráty vlastností nebo kvality. [10]



Obr. 13. schéma rekonstituce vosků [10]

## 6.2 Kontrola kvality voskové směsi pro regeneraci

Výrobci vosků trvají na totální kontrole kvality během procesu. Příchozí materiál ze slévárny je označen a skladován odděleně, takže zákazníci obdrží zpět jejich vlastní materiál (k zajištění vyloučení nežádoucích složek).

Vosky jsou dále testovány na:

- Obsah popelovin
- Bod tavení a tuhnutí
- Viskozita
- Obsah plniva
- Obsah vody

Z těchto výsledků, závislých na požadavcích, jsou přidány suroviny, aby se regeneroval nebo rekonstituoval vosk na požadované hodnoty.

Důležité je, aby vosk odeslaný ze slévárny byl čistý bez odpadu z podlahy slévárny a jiných druhů nečistot a bez zbytků rozbitých skořepin. Měla by se také minimalizovat voda smíchaná s voskem během vytavování v autoklávu. [10]

## ZÁVĚR

Technologie vytavitelného modelu zaujala přední místo mezi moderními slévárenskými technologiemi a během více jak padesátiletého vývoje se tato technologie rozšířila na běžně dostupnou. Tato technologie se používá především při výrobě specifických druhů výrobků, které se vyznačují především tvarovou složitostí, které by nešli jinou metodou vyrobit, nebo by byla jejich výroba nákladná. Technologie vytavitelného modelu je úzce spjata s cílem sléváren výroby odlitků „téměř na hotovo“ tzn. bez nutnosti dalších dokončujících operací, což zefektivňuje výrobu a šetří náklady.

Významnou fází při výrobě hotové formy pro odlévání je vytavení voskového modelu z keramické skořepiny. Při procesu vytavování je důležité, aby se skořepina neporušila a všechen vosk se odstranil. Velký vliv při vytavování hraje rozdílná dilatace vosku a keramické skořepiny. Vosk dilatuje více a hlavně rychleji. Při vytavování vosku ze skořepin je důležité, aby se vytvořila dilatační spára, vzniklá tepelným šokem na kontaktním povrchu mezi skořepinou a voskovým modelem. Tím se odtaví kontaktní vrstva vosku na hranici forma-voskový model a zabrání se tak praskáním skořepiny vlivem velké roztažnosti vosku. Proto je pro vytavování voskového modelu ze skořepin důležité zvolit vhodnou technologii, která toto zaručí.

Existuje mnoho metod pro vytavování vosku, ale v současnosti je vytlačily jiné dvě metody. Nejrozšířenější metodou ve slévárnách se stalo vytavování v autoklávu v přehřáté páře. Vytavování v boilerklávu je vzhledem ke své jednoduchosti, účinnosti vytavování vosku a výkonnosti nejrozšířenější technologií používané ve slévárnách. Další významná technologie je vytavování vyžiháním (Flash fire system), jež pracuje na principu vyžihání vosku za vysokých teplot v žíhací peci. Vosk se velmi rychle vytaví a navíc odpadá nutnost dokončovací operace vypálení zbytkového vosku uvnitř formy. Obě metody jsou velice produktivní a ekonomické, vhodné jak pro malé, tak i pro velké slévárny. Důležité u těchto technologií je velmi vysoké procento vosku pro regeneraci.

Velký význam má v současnosti recyklace vytaveného vosku. Recyklace použitých voskových směsí je dnes důležitá nejen z hlediska ušetření financí, ale nemalý důraz je kladen i na ekologickou likvidaci.

V současnosti mají recyklované vosky stejné a mnohdy lepší vlastnosti než nové vosky.

Současnou snahou v technologii vytavování je zrychlení doby vytavování vosku, odstranění dokončovací operace žíhání zbytkového vosku ve skořepině a získání co největšího množství vosku pro regeneraci. S rozvojem mikrovlnných technologií vznikla nová technologie vytavování vosku mikrovlnným ohřevem. Působení vysokého mikrovlnného záření způsobuje ohřev částic uvnitř skořepiny a tím dochází k natavení voskového modelu. Tato metoda je velice efektivní, ale stále je ve fázích laboratorních pokusů. Ale je pouze otázka času, kdy se tato technologie zavede do sléváren a stane se jedním z významných technologických procesů pro vytavování vosku ze skořepin.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. HORÁČEK, M. *Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí*. Slévárství. Říjen 2001, roč. XLIX, č. 10, s. 570–580. ISSN 0037-6825.
2. BEELEY, PR. and SMART, RF. *Investment Casting*. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
3. KRACMAN, O. *Faktory ovlivňující přesnost odlitků u metody voskového modelu*. ČVUT Praha: 10s, Dostupný z WWW: <stc.fs.cvut.cz>.
4. HORÁČEK, M. *Výroba přesných odlitků*. VUT Brno: Obor slévárství ÚST [online].
5. DOŠKÁŘ, J., aj. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
6. <http://www.lbbctechnologies.com>.
7. <http://www.pacifickiln.com/investment.html>.
8. <http://www.freepatentsonline.com/3847202.html>.
9. HERMAN, A. *Lití na vytavitelný model*. ČVUT Praha, cit. 2009-05-20, 30s. Dostupný z WWW: <stc.fs.cvut.cz>.
10. HORÁČEK, M. *Současné trendy v technologii vytavitelného modelu*. VUT Brno: obor slévárství ÚST [online].

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

| Zkratka/Symbol | Jednotka | Popis |
|----------------|----------|-------|
|----------------|----------|-------|

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 ...  
Příloha 2 ...  
Příloha 3 ...  
Příloha 4 ...  
Příloha 5 ...  
... ...  
Příloha 10 ...

## **Příloha 1**