



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI POUŽITÍ FILTRACE U TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

POSSIBILITIES OF USING FILTRATION IN LOST WAX TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÍTĚZSLAV BOČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vítězslav Boček

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

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

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

Možnosti použití filtrace u technologie vytavitelného modelu

v anglickém jazyce:

Possibilities of using filtration in lost wax technology

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární rozbor problematiky filtrace tekutého kovu při odlévání do skořepinových forem u metody vytavitelného modelu. Srovnání použití různých typů filtrů a jejich optimální umístění ve vtokové soustavě.

Cíle bakalářské práce:

Přehled možností aplikace filtrace tavenin u technologie vytavitelného modelu.

Seznam odborné literatury:

BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.

CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.

HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství. 2001, č. 10, s. 570 –580. ISSN 0037-6825.

HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. In: Proceedings of the World Technical Forum. Česká slévárenská společnost, Brno, 1.– 3.6.2009.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 5.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

BOČEK Vítězslav: Možnosti použití filtrace u technologie vytavitelného modelu.

Závěrečná práce, vypracovaná v rámci bakalářského studia oboru Strojírenská technologie, se zabývá literárním rozborem problematiky filtrace tekutého kovu při odlévání do skořepinových forem u metody vytavitelného modelu, srovnáním použití různých typů filtrů a jejich optimálním umístěním ve vtokové soustavě. Na základě této práce byly stanoveny kritéria výběru typu filtru pro metodu odlévání na vytavitelný model, a byly zmapovány možnosti umístění těchto filtrů ve vtokové soustavě.

Klíčová slova: Slévárství, přesné lití, vytavitelný model, filtrace, vtoková soustava

ABSTRACT

BOČEK Vítězslav: Possibilities of using filtration in lost wax technology.

Final thesis, elaborated within the bachelor study field of Manufacturing technology, deals with literary analysis of using filtration in lost wax technology and with designing of best gating system for those filters. As result of this thesis the best criteria for choosing the best filter for application in lost wax casting and literary study mapping possibilities of locating those filters in gating system was compiled.

Keywords: Foundry, investment casting, lost wax, filtration, gating system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOČEK, Vítězslav. Možnosti použití filtrace u technologie vytavitelného modelu. Brno, 2015. 35s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD.....9

1 TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU10

1.1 HISTORIE TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU12

1.2 SOUČASNOST A BUDOUCNOST VÝVOJE TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO
MODELU13

2 FILTRACE TEKUTÉHO KOVU15

2.1 HISTORIE FILTRACE16

2.2 FILTRAČNÍ MECHANISMY17

2.3 TYPY POUŽÍVANÝCH FILTRŮ19

2.3.1 Ploché filtry.....19

2.3.2 Objemové filtry.....20

2.4 POŽADAVKY KLADENÉ NA FILTRY22

2.5 MATERIÁLY KERAMICKÝCH FILTRŮ24

2.6 VLIV FILTRŮ NA TOK KOVU25

2.6.1 Kontrola licí rychlosti25

2.6.2 Usměrnění toku kovu.....26

2.7 USNADNĚNÍ ODSTRAŇOVÁNÍ VTOKOVÉ SOUSTAVY26

2.8 VOLBA VHODNÉ HUSTOTY PĚNOVÉHO KERAMICKÉHO FILTRU27

3 NEGATIVNÍ VLIV VMĚSTKŮ V ODLITKU28

**4 MOŽNOSTI UMÍSTĚNÍ FILTRŮ U METODY PŘESNÉHO LITÍ NA
VYTAVITELNÝ MODEL.....29**

4.1 UMÍSTĚNÍ FILTRU VE VTOKOVÉ SOUSTAVĚ.....30

4.2 UMÍSTĚNÍ FILTRU V LICÍ JAMCE.....31

5 SPECIFIKA SPOJENÁ S FILTRACÍ U METODY PŘESNÉHO LITÍ32

5.1 NÁVRH USPOŘÁDÁNÍ MODELŮ32

5.2 MOŽNOSTI VKLÁDÁNÍ FILTRŮ DO SKOŘEPINY33

5.3 ZVÝŠENÉ ZAHLCOVÁNÍ FILTRU33

5.4 VÝHODNOST POUŽITÍ FILTRŮ U TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO
MODELU34

5.5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SIMULACÍ U FILTRACE34

ZÁVĚR35

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SEZNAM OBRÁZKŮ

SEZNAM TABULEK

SEZNAM VZORCŮ

ÚVOD

Odlévání kovů metodou vytavitelného modelu (také označovaná jako lití "na ztracený vosk" nebo jako "přesné lití") se řadí mezi vysoce náročné technologie výroby odlitků s vysokou přidanou hodnotou, a jako taková zaujímá jedno z předních míst v oblasti moderních slévárenských technologií . V průběhu historie této metody došlo k její transformaci z metody vysoce specializované na metodu všeobecně rozšířenou. Důvody vedoucími k rozšíření této metody slévárenské technologie jsou především neustále se zvyšující nároky zákazníků na kvalitu odlitků, které nutí slévárny k zavedení moderních kroků určených ke zvýšení kvality odlitků. Ekonomické faktory pak nutí slévárny k zavádění kroků určených ke snížení počtu neshodných odlitků (zmetků).

Tyto důvody vedou ke snaze o zlepšení jakosti tekutého kovu, čímž lze snížit počet neshodných odlitků (zmetků) vzniklých různými vadami způsobenými nečistotami obsaženými v tekutém kovu. Může se jednat například o zbytkovou strusku nebo vměstky.

Jednou z možností, jak zvýšit kvalitu tekutého kovu při odlévání do formy, je využití některé z možností filtrace, například pomocí pěnových filtrů vhodně uložených ve vtokové soustavě, které jsou schopné tyto nečistoty zachytit.



Obr.1 Příklady výrobků vyrobených metodou lití na vytavitelný model

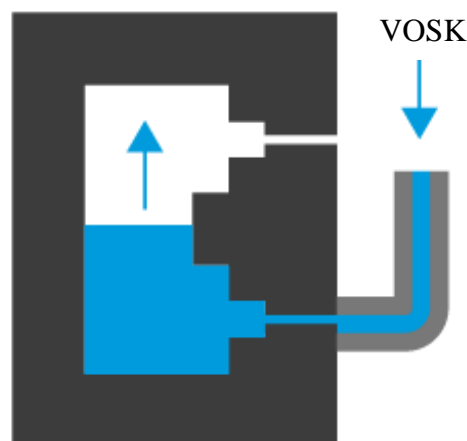
1 TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Technologie odlévání na vytavitelný model (v anglickém jazyce "investment casting") je způsob odlévání roztaveného kovu do předem připravených forem často velice složitých tvarů. Tato metoda se řadí do II. generace výroby forem a jader, přesněji do oblasti výroby keramických forem a jader. Při této metodě se využívá netrvalého, vytavitelného modelu z vosku. Celý proces výroby touto metodou lze rozdělit do několika základních částí: [1]

- Výroba matečné formy: Matečná forma (obr.2) je forma vyrobená, podle tzv. matečného modelu (z nízkotavitelných slitin, metalizováním, galvanoplasticky) nebo častěji obráběním z kovových bloků.
- Zhotovení voskového modelu: Kvalita výsledného odlitku je přímo úměrná kvalitě voskového modelu (obr.3) podle nějž je výrobek vyroben. Voskové modely se vyrábějí několika způsoby: gravitačním odléváním (nad teplotou likvidu vosku), vstřikováním za zvýšeného tlaku (0,5-1 MPa, za teploty těsně pod teplotou likvidu vosku, z tzv. napěněného vosku) nebo za vysokých tlaků (2,5-5 MPa, za teploty pod teplotou likvidu vosku). V současné době se jako modelové hmoty využívají komplexní voskové materiály které obsahují více složek jako například: přírodní a syntetické vosky a pryskyřice, organická plnidla a vodu. Tyto voskové materiály lze rozdělit do několika základních skupin:
 - a) Přímé (neplněné)
 - b) Plněné (30% plniva)
 - c) emulzifikované (vodou, vzduchem)

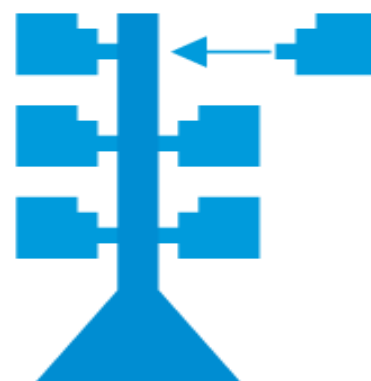


Obr.2 výroba matečné formy [3]



Obr.3 výroba voskového modelu [3]

- Sestavení voskových modelů: Používá se pro zvýšení ekonomičnosti odlévání, umožňuje odlít několika odlitků naráz. Obvykle následuje po stabilizaci voskového modelu (obvykle min. 24hodin), spočívá v sestavení menších modelů do tzv. stromečků (obr.4), pomocí pájení či lepení. Tvar stromečku je dán velikostí a tvarem jednotlivých modelů, technikou obalování, vytavování, lití a oddělování odlitků od vtokové soustavy. Vtoková soustava bývá obvykle vyrobena z méně kvalitního regenerovaného vosku.

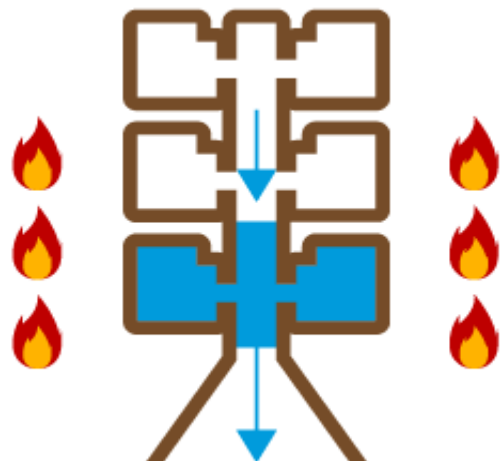


Obr.4 skládání stromečku [3]

- Obalování a sušení modelů: Dochází k ponoření modelu (stromečku) do keramické hmoty, která je tvořena pojivem a plnivem (obr.5). Po okapaní přebytku hmoty dochází k posypu modelu zrnitým keramickým materiálem (nejčastěji křemenná moučka). Po uschnutí modelu (na vzduchu nebo působením plynného činidla - čpavku) se obalování opakuje. Tímto postupem se vytvoří obvykle 5-8 obalů.
- Vytavování modelové hmoty (obr.6): Při vytavování je důležité, aby se nejprve vytvořila dilatační spára, která umožňuje modelu mírnou změnu rozměrů vlivem tepla, čímž zamezuje vzniku prasklin vlivem rozdílných teplotních roztažností voskového modelu a keramické skořepiny. Dochází k němu za:
 - a) za vysoké teploty:
 - vložením do pece o teplotě 750°C a následným žiháním
 - b) za nízké teploty:
 - ve vroucí vodě
 - v autoklávu v přehřáté páře (0,3-0,6 MPa a 135-165°C)
 - dielektrickým ohřevem (ohřev pomocí vysokofrekvenčních oscilací)
 - proudem teplého vzduchu do středu modelu

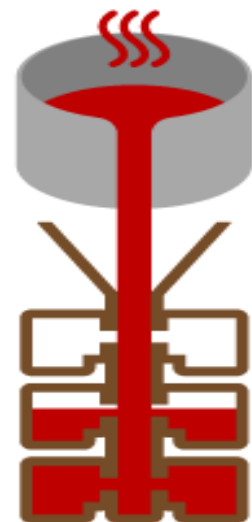


Obr.5 obalování modelů [3]



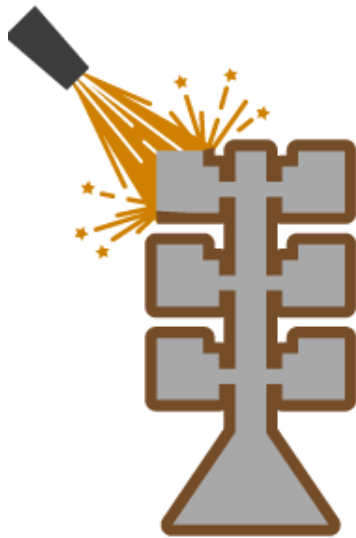
Obr.6 vytavování vosku [3]

- Žihání skořepiny: Je nutné ke změně amorfní formy vrstvičky SiO_2 na krystalickou a zároveň slouží k odstranění zbytkových těkavých látek ve skořepině. Teplota žihání se pohybuje v rozmezí 900-1000°C pro SiO_2 nebo 1200-1400°C pro korund, molochit aj.
- Odlévání: Odlévá se obvykle na vzduchu (obr.7) nebo ve vakuu. Skořepinové formy se před odléváním mohou předehřívát na 700-800°C (lití do žhavých forem) nebo se odlévá do skořepin o teplotě okolí (lití do studených forem - nelze používat u křemenných forem z důvodu nebezpečí popraskání vlivem transformace křemene při 572°C)

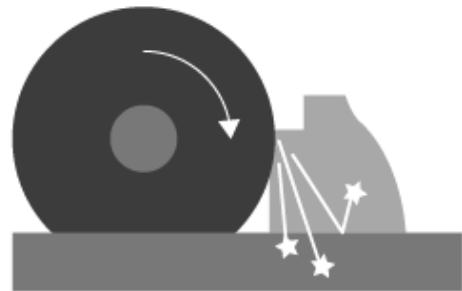


Obr.7 odlévání na vzduchu [3]

- **Odstraňování skořepiny:** Dochází k odstraňování skořepiny, zbytky skořepiny lze posléze recyklovat a znovu použít. K odstranění vypálené skořepiny se používá:
 - otryskávání (obr.8) (pískování)
 - vibrační vytrásání
 - pomocí tlakové vody
 - chemickým působením
- **Dokončovací operace:** Odlévání na vytavitelný model je metodou, při níž se získává vysoká jakost výsledného výrobku bez nutnosti dodatečných úprav. Jedinými dokončovacími operacemi je tedy tepelné zpracování a odstranění vtokové soustavy, což se děje broušením (obr.6), řezáním vodním paprskem nebo u větších odlitků řezáním plamenem.



Obr.8 otryskávání skořepiny[3]



Obr.9 dokončování broušením [3]

- **Kontrola:** chemické složení a struktura (metalografie), vnitřní jakost odlitků (rentgen, ultrazvuk), povrchová kvalita odlitků (kapilární metody), mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, tažnost a tvrdost), rozměrová přesnost. [1], [2] [3]

1.1 HISTORIE TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Počátky metody přesného lití na vytavitelný model se datují až do doby 5-6 tisíc let před naším letopočtem, kdy se využíval včelí vosk ke zhotovení modelů, které se poté ručně obalily vhodnou hlinou a po vypálení se takto zhotovená forma dala využít pro odlévání bronzu. Již v tomto období se využívalo hliněných jader ke zhotovování dutých odlitků. V tomto období se tato technologie uplatňovala převážně v umělecké oblasti. Odlitky vytvořené metodou vytavitelného modelu lze najít mezi uměleckými díly všech starověkých národů jako třeba: Egypt, Palestina, Babylon, Čína nebo Mexiko a Peru. [4]

Velkého rozšíření se tato umělecká metoda dočkala například v období renesance, představitelem tohoto období je například umělec Benvenuto Cellini a jeho socha Persea s hlavou Medusy (obr.10), který je také autorem jedné z prvních publikací o této



Obr.10 Perseus s hlavou Medusy [5]

metodě, když popsal principy odzdušnění nálitkování atp.. Z tohoto období pochází také první zmínka o českém zastoupení a to v podobě prací Vavřince Kříčky z Prahy, který v 16. století našeho letopočtu sepsal práci na téma "průvodce v odlévání a přípravě kanónů, koulí, moždířů a zvonů, kde tuto metodu podrobně popisuje. [1], [2]

Po období renesance došlo k úpadku metody přesného lití na vytavitelný model, kdy se využívala pouze v zubní technice (korunky, zubní protézy) a v bižuterii. [1]

V moderním období došlo ke znovuobjevení této metody v průběhu druhé světové války v letech 1940-1945, kdy v důsledku nutnosti rychlého zbrojení a zlepšování výzbroje došlo ke zdokonalení této metody, která umožnila odlévání tvarově velice složitých odlitků s úzkými výrobními tolerancemi a s vysokou jakostí povrchu, například některé části zbraní (obr.11). [6]

Se zdokonalováním této technologie došlo k rozšiřování oblasti jejího použití, například do oblasti letectví a kosmonautiky, automobilového průmyslu a dalších oblastí slévárenství, takže po skončení druhé světové války se již tato metoda stala nedílnou součástí slévárenských metod.[1], [2]

Původní starověká myšlenka výroby zůstala zachována ale rozvoj vědy umožnil vypracovat použití nových formovacích a modelovacích hmot a moderních postupů doplněných mechanizací tak, jak je známe nyní. [4]



Obr.11 odlitky zbraní [6]

1.2 SOUČASNOST A BUDOUCNOST VÝVOJE TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU [7]

Moderní požadavky na odlitky vyrobené metodou přesného lití na vytavitelný model jsou: a) odlitky reprodukovatelné ve velkých sériích s minimálními odchylkami

b) schopnost odlévat slitiny s vysokou teplotou tavení

c) vysoká kvalita a přesnost výroby

d) cena musí být nižší než alternativní způsoby výroby

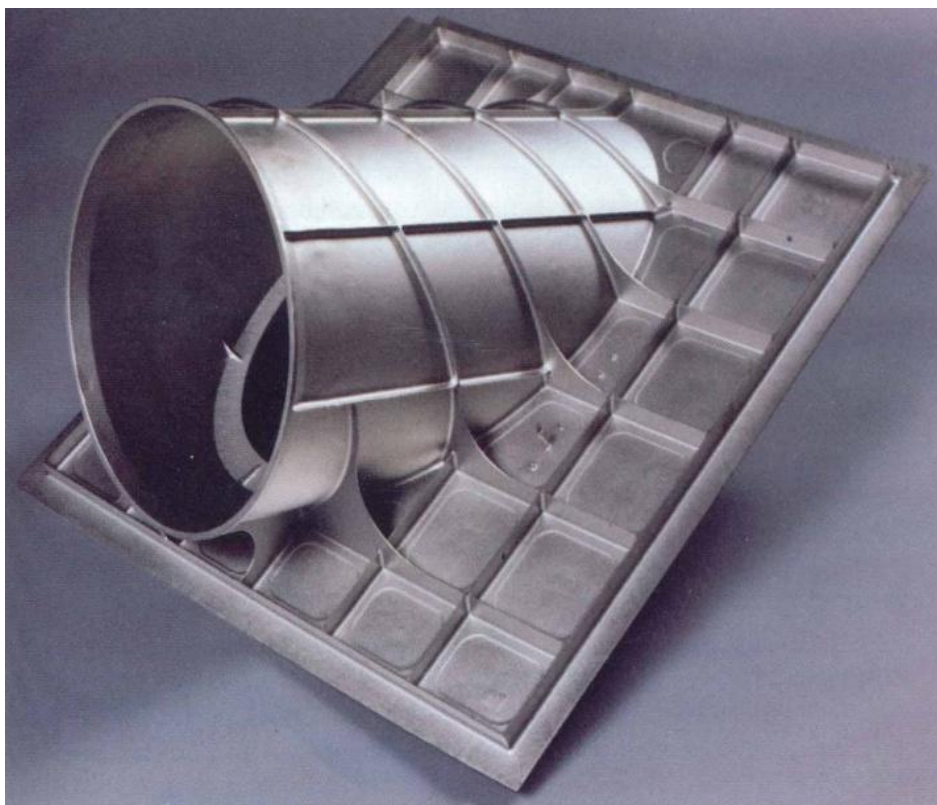
- Superslitiny: Jednou z cest budoucího rozvoje odlévání metodou přesného lití na vytavitelný model je oblast superslitin. Některé strojírenské součástky jako například lopatky turbín proudových motorů (obr.12), musí být schopny snášet vysokou zátěž. Z tohoto důvodu se k výrobě těchto součástí využívá superslitin. V současnosti stoupá například poptávka po lopatkách spalovacích turbín pro elektrárenský provoz,



Obr.12 lopatky turbíny ze superslitiny [8]

vyráběných metodou přesného lití. Důvodem této zvýšené poptávky je současné zdokonalení této metody do fáze, kdy lopatky vyráběné metodou přesného lití dosahují lepších výsledků nežli ty vyráběné jinými způsoby.

- Oceli: V současnosti dochází i nadále k rozšiřování možností využití ocelových odlitků vyrobených metodou přesného lití, přímo úměrnému tomu, jak návrháři a konstruktéři rozeznávají možnosti této metody. Metoda přesného lití nachází uplatnění v oblastech jako je, kosmický a letecký průmysl, petrochemický průmysl, textilní průmysl a v mnoha dalších oblastech moderního strojírenství.
- Slitiny hliníku: Slitiny hliníku jsou nejvíce využívanými neželeznými slitinami u metody přesného lití. V této oblasti se metodou přesného lití vyrábí odlitky pro vojenské, automobilní, elektrotechnické, letecké (obr.13), kosmické odvětví a další. I nadále dochází ke zlepšování vlastností skořepin a způsobů odlévání, což dovoluje nadále snižovat minimální tloušťku stěny odlitku a tím snižovat jeho váhu. Nárůst poptávky po vysoce kvalitních hliníkovo-křemíkovo-hořčíkových odlitcích znamená, že slévárny jsou schopny nabídnou svoje odlitky pro specializované součástky, jako jsou například trupy letadel.



Obr.13 součást sacího potrubí letadla [6]

Problémy s životním prostředím: V nedávné době došlo k několika objevům zlepšujícím ekologické podmínky ve slévárnách přesného lití. Hledají se způsoby, jak tuto situaci i nadále zlepšovat. Velká část evropských sléváren využívá i ještě stále pojiva založená na alkoholu (ethyl silikáty). Emise produkované těmito pojivy mohou překročit povolené ekologické normy. Z tohoto důvodu stále více sléváren přechází na pojiva založená na vodě. Nejnovějším objevem na tomto poli jsou například rychle schnoucí vodní pojiva, která byla představena jako náhražka tradičních pojiv.

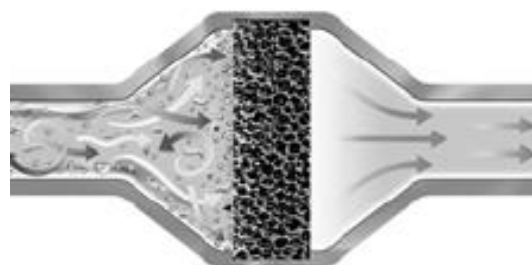
2 FILTRACE TEKUTÉHO KOVU

Vlivem vysoké konkurence v oboru, se slévárny snaží docílit co možná nejvyšší kvality svých odlitků, a zároveň co nejnižších nákladů. Určujícím faktorem kvality odlitku je, aby splňoval požadované mechanické, technologické, strukturní a další vlastnosti. Tyto vlastnosti často přímo souvisí s výskytem cizích částic neboli nečistot v odlévaném kovu. Jedním ze způsobů jak výskytu těchto nečistot zamezit nebo alespoň omezit jejich množství, je prostřednictvím filtrace taveniny za použití filtrů vložených přímo ve vtokové soustavě (obr.14). V praxi se tímto zamezí přítomnosti nečistot, které by se mohly do odlitku dostat odléváním kovu do pánve. Nečistoty neboli vměstky se obecně rozdělují dle jejich složení na kovové a nekovové. Častější je výskyt vměstků nekovových, které jsou pro výslednou kvalitu odlitku nebezpečnější. [9]

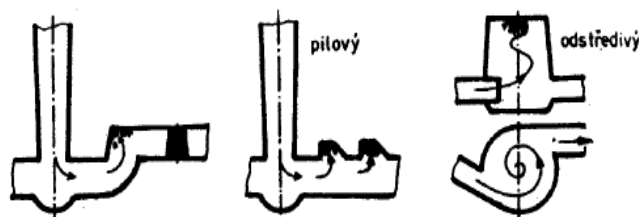
Existuje více možností, jak omezit přítomnost vměstků v tavenině, například za použití speciálních částí vtokové soustavy, takzvaných struskováků (pilových, rotačních, odstředivých; viz obr.15). Ty fungují na principu rozdílných hustot vměstků a tekutého kovu, takže jsou vhodné především pro odlévání slitin železa, u nichž hustota kovu výrazně převyšuje hustotu vměstků. Naopak nelze tohoto principu využívat při odlévání materiálů, u kterých vměstky a kov mají podobnou hustotu, například u slitin hliníku. Nevýhodou této metody je ovšem složitější vtoková soustava a tím také vyšší náklady. [9]

Další metodou filtrace, která se široce využívá, je princip prostého cezení přes různé typy tkaninových nebo keramických filtrů, tato metoda je obvykle spojena s metodou tzv. filtračního koláče. Nejvíce rozšířenou metodou je použití keramických objemových filtrů, které využívají principů hloubkové filtrace. Oba výše uvedené druhy filtrů mohou být umístěny přímo do vtokové soustavy. Zároveň také slouží ke zklidnění a usměrnění toku taveniny a k zabránění vzniku vírů v tavenině, které by jinak mohly vést ke strhávání strusky do taveniny. [10]

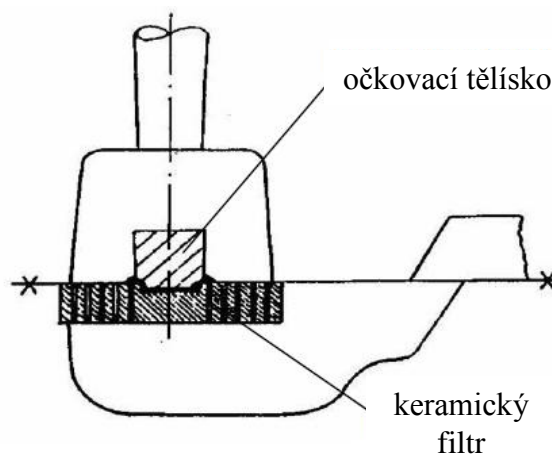
Použití filtrů tedy vede ke zjednodušení vtokové soustavy, čímž lze dosáhnout úspory množství tekutého kovu potřebného k odlévání odlitků. Dále dochází k vyššímu využití dělicí roviny formy a ke snížení pracnosti v čistírně. Podstatnou výhodou filtrů je také možnost využít je k různým metalurgickým zásahům, jako například k očkování litin. Tohoto lze docílit použitím očkovacích tělísek, která se umísťují přímo na filtrech (obr.16), nebo pomocí očkovadel nanesených na keramiku filtru. [10]



Obr.14 umístění filtru ve vtokové soustavě [9]



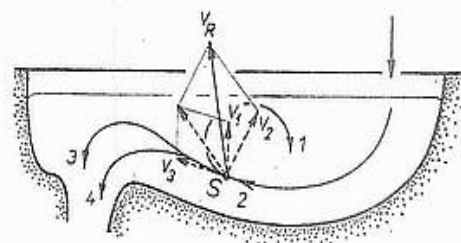
Obr.15 různé druhy struskováků [9]



Obr.16 očkovací tělísko na filtru [10]

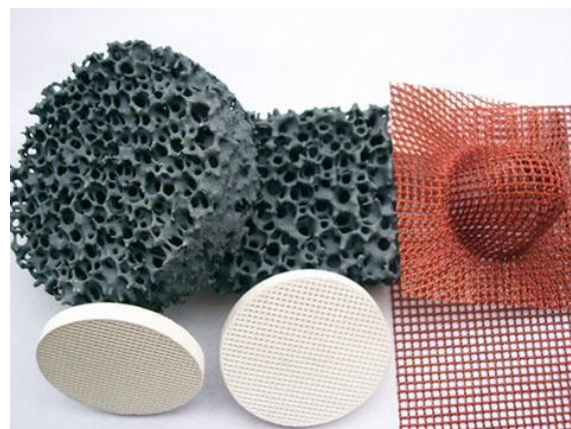
2.1 HISTORIE FILTRACE

Snaha o zefektivnění a navýšení výroby odlitků sahá až do počátků slévárenství. Po celá staletí se slévárny snažily o výrobu odlitků s vyšší jakostí tj. s kvalitnějším povrchem, vyšší čistotou a lepšími strojními vlastnostmi, čehož lze dosáhnout snížením nečistot v odlitku. První moderní metody filtrace tekutého kovu ve slévárenství se začali používat zhruba v 30. letech minulého století, kdy se začalo využívat zákonů o proudění a empirických zkušeností, započalo se se systematickým přístupem ke konstrukci a dimenzování vtokových soustav. Jedním z důležitých hledisek konstrukce vtokových soustav byla účinnost zachycování vměstků. Separace vměstků se dosahovalo zejména tvorbou masivních licích jamek (se zátkou nebo s přepážkou; viz obr.17), a také jejich zachycováním ve speciálních sekcích vtokové soustavy – tzv. struskovacích. Tato řešení byla založena na rozdílné hustotě vměstků a tekutého kovu. Obecně se dá účinnost této metody označit jako omezená. [11]



Obr.17 masivní licí jamka [11]

Přibližně od poloviny 60. let se ve slévárnách začala používat keramická „cedítka“. Umísťovala se nejčastěji do vtokové jamky v místě přechodu do kůlu a jejich účelem bylo především zachycení hrubých částic strusky. Společná nevýhoda všech těchto metod je především masivní vtoková soustava, což snižuje využití tekutého kovu a prodražuje výrobu. Až na konci 70. let se začínají používat prostředky pro zachycení vměstků ve vtokové soustavě – sítky a filtry (obr.18). V počátku, je jejich využívání spojeno s odléváním hliníkových slitin, především pro letecký průmysl. [11]



Obr.18 různé typy filtrů a síték [12]

Filtrace slitin železa je komplikována podstatně vyššími teplotami kovu a vyššími nároky na chování filtrů za vysokých teplot. K hromadnému nasazení filtrů, dochází především s rozvojem výroby litiny s kuličkovým grafitem v průběhu 80. let a zejména v letech devadesátých. Filtrace oceli je komplikována především vysokými požadavky na odolnost keramiky proti vysokým teplotám až do 1700 °C a s tím spojenou vyšší cenou filtrů. Z tohoto důvodu se filtrace při lití oceli používala především pro speciální a vysoce náročné odlitky. Obrovský nárůst filtrace (nejen) oceli byl zaznamenán počátkem 21. století, což bylo dáno zejména dramatickým navyšování cen kovů a masovějším rozšířením technologie přímého lití kovu přes náletek za použití exotermických nástavců (obr.19) a obkladů nebo speciálních filtrů na bázi uhlíku. [11], [13]



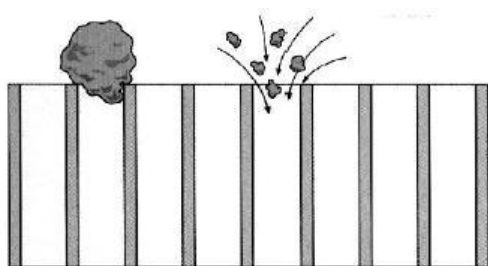
Obr.19 exotermický nástavec [13]

dáno zejména dramatickým navyšování cen kovů a masovějším rozšířením technologie přímého lití kovu přes náletek za použití exotermických nástavců (obr.19) a obkladů nebo speciálních filtrů na bázi uhlíku. [11], [13]

2.2 FILTRAČNÍ MECHANISMY [10]

Filtraci lze obecně rozdělit na tři základní mechanismy:

- Filtrace cezením: Na vstupní straně filtru dochází k zachytávání velkých částic strusky a vměstků, které jsou větší než rozměry otvorů ve filtru, respektive jeho pórů. Tyto částice tedy neprojdou filtrem do dutiny formy kvůli své velikosti. U slitin hliníku se takto zachytávají především oxidické blány. Obr. 20 znázorňuje funkci mechanismu filtrace cezením a na obr. 21 lze vidět shluk exogenních vměstků zachycených na čelní straně filtru.

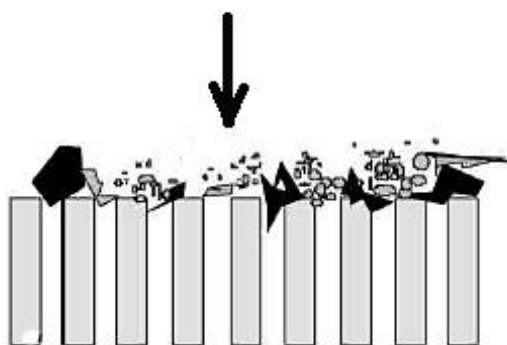


Obr.20 mechanismus cezení [10]

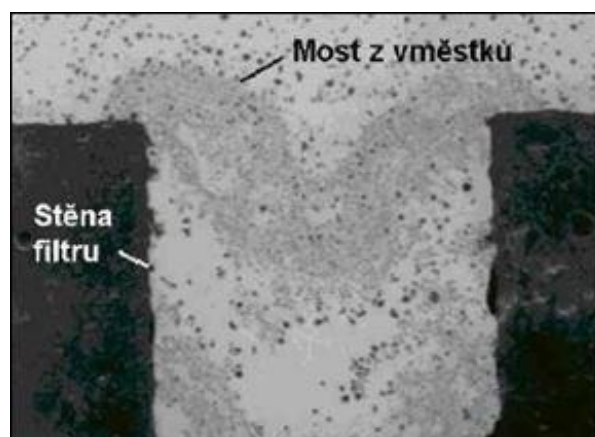


Obr.21 zachycený shluk zrn formovací směsi [10]

- Tvorba filtračního koláče: Rozměrné částice, které se v průběhu filtrace nashromáždily na čelní straně filtru, vytváří shluk, kterému říkáme "filtrační koláč" obr. 22 (šipka znázorňuje směr tečení kovu). Tento útvar následně zachycuje menší vměstky, které by při prosté filtrace cezením protekly. Tato filtrační vrstva se postupně zvětšuje až dojde k úplnému ucpání filtru. Filtrační mechanismem filtračního koláče se zachycují i velmi drobné vměstky s rozměry až 1-5 μm , obr.23.



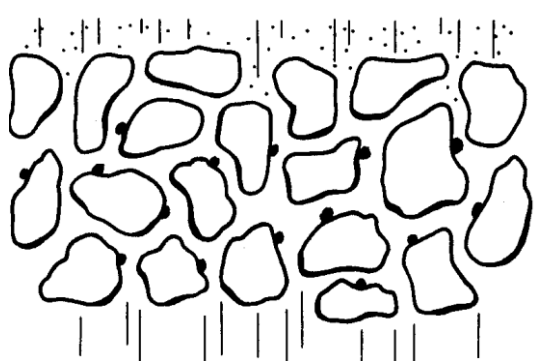
Obr.22 tvorba filtračního koláče [10]



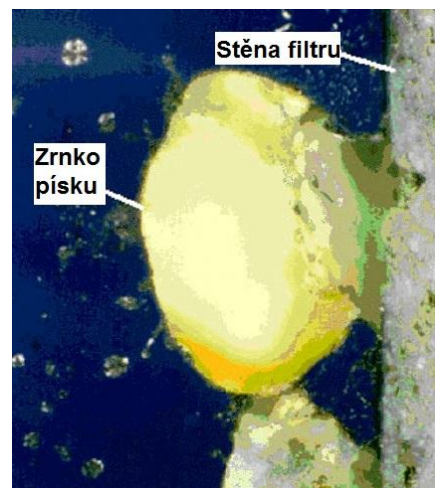
Obr.23 můstek z vměstků přes otvor ve filtru [10]

- Hloubková filtrace: Na tomto druhu filtrace se podílí svým účinkem celý objem filtru. Princip je založen na přilnavosti vměstků (nalepování) na stěny keramického filtru (obr.24) a na vzájemné přilnavosti jednotlivých částic vměstků. Na obr.25 lze vidět zachycení zrnka písku na stěně filtru. V průběhu hloubkové filtrace se částice vměstků nabalují na keramiku filtru a na sebe navzájem, čímž vytvářejí "můstky" s rohy upevněnými v jednotlivých pórech filtru. Efektivita hloubkové filtrace je ovlivněna:

- teplotou odlévaného kovu
- chemickým složením materiálu filtru
- chemickým složením vměstků
- tvarem a velikostí pórů filtru



Obr.24 hloubková filtrace [10]



Obr.25 zrnko písku zachycené na stěně filtru [10]

Pravděpodobnost zachycení vměstků pomocí hloubkové filtrace lze zvýšit pomocí zmenšení průřezu vtokového kanálu, přínosem je také zvýšené víření a změny toku kovu. Adhezivní síly udržují jednotlivé vměstky pohromadě a zadržují je na stěně filtru. Aby mohlo dojít k zachycení vměstku hloubkovou filtrací, je nutné aby adhezivní síly byly vyšší, než dynamický účinek kovu, který se naopak snaží strhnout vměstky do proudu kovu. Z toho vyplývá že šance na zachycení vměstků se zvyšuje s velikostí adhezivní síly a snižuje se v závislosti na velikosti dynamického účinku kovu. Místa s velice nízkou rychlostí toku kovu jsou tak ideální pro hloubkovou filtraci.

K adhezi tekutých (viskózních) vměstků k filtru dochází v závislosti na mezifázové energii mezi tekutým kovem (M), vměstkem (I) a filtrem (F). Jestliže bude Gibsova volná energie daná rovnicí (2.2.1) menší než 0 ($\Delta G < 0$), pak bude inkluze pevně fixována k povrchu filtru.

$$\Delta G = \sigma_{IF} - \sigma_{MF} - \sigma_{MI} \quad (2.2.1)$$

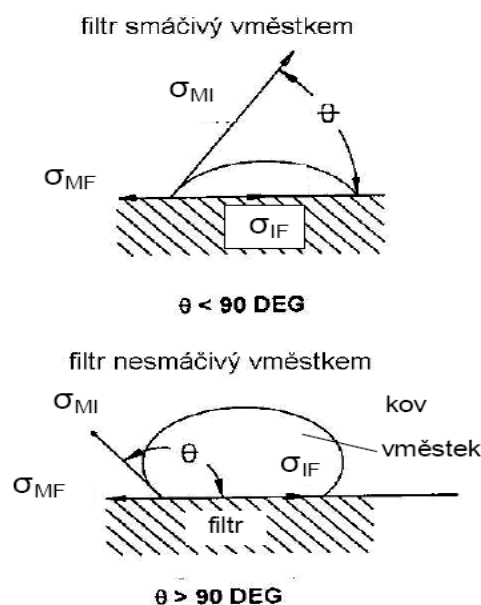
Kde σ mezifázová energie

Poměr mezifázových napětí mezi kovem, vměstkem a filtrem se projevuje jako vzájemná smáčivost nebo nescháčivost jednotlivých složek. Smáčivost lze charakterizovat pomocí velikosti úhlu smáčení θ a jejím projevem je změna tvaru menisku tekuté fáze (obr.26). V případě, že filtr je tekutým vměstkem smáčivý, je úhel $\theta < 90^\circ$. U nescháčivého vměstku je úhel naopak $\theta > 90^\circ$. Velikost adhezní síly je dána vztahem (2.2.2)

$$(WA)_{IF} = \sigma_{MI}(1 + \cos\theta_{FI-MI}) \quad (2.2.2)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že mezi smáčivostí a velikostí fixační síly platí přímá úměrnost, tzn. že čím vyšší je smáčivost filtru tekutým vměstkem, tím větší jsou fixační síly. Pomocí tohoto mechanismu filtrace lze zachytit také tuhé vměstky. V případě nesmáčivosti materiálu filtru i tuhého vměstku, je vměstek kapilárními silami vytlačen ke stěně filtru a zde je těmito silami zadržován. Různé materiály a různé vměstky mají různou smáčivost tekutým kovem a tedy i různou schopnost zachycovat tuhé vměstky.

Kromě výše uvedených fyzických vazeb lze při daných licích teplotách očekávat také chemické reakce a vazby mezi filtrem a vměstkou. V systémech s chemickou reakcí, chemické vazby mezi filtrem a vměstkou jsou postupně vytvářeny. Z tohoto důvodu filtry se změkčovací teplotou blízkou k teplotě licí, mají zpravidla vyšší filtrační efektivitu.



Obr.26 smáčení filtru tekutým vměstkem [10]

2.3 TYPY POUŽÍVANÝCH FILTRŮ

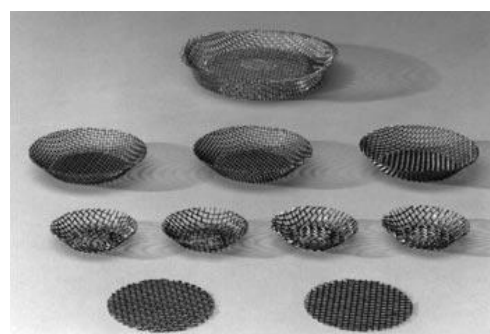
U metody přesného lití lze využívat široké škály dostupných typů filtrů. Základní typy filtrů lze rozdělit podle jejich rozměrů a druhu filtrace na dva typy a to:

- ploché filtry
- objemové filtry

2.3.1 Ploché filtry

Jedná se o filtry, u kterých je jejich tloušťka zanedbatelná. Všechny vměstky větší než je velikost ok sítka jsou zachycovány na vnější straně filtru, kde dochází ke zformování filtračního koláče. U tohoto typu filtrů nedochází k hloubkové filtraci (nebo jen v zanedbatelné míře). Mezi ploché filtry se řadí:

- Kovová síťka (obr.27) : Použití tohoto typu filtrů je limitováno pouze na slitiny s nižší licí teplotou (např. slitiny hliníku). Ocelová drátěná síťka s oky o velikosti přibližně 2-3 mm jsou nastříhána na kusy které velikostně překračují velikost průřezu vtokového kanálku, ve kterém budou umístěna. Síťka se obvykle umísťují ve speciální části vtokové soustavy. V případě, že je mřížka umístěna vertikálně je nutné vložit ji do žlábků ve vtokové soustavě ještě před samotným odléváním. Pokud je mřížka umístěna horizontálně v dělicí rovině, může být uložena volně. Protože vměstky v hliníkových slitinách se vyskytují hlavně ve formě povlaků, je efektivita zachycování kovových sítok relativně dobrá. Velkou výhodou je jejich nízká pořizovací cena. Naopak nevýhodou je, že po ztuhnutí odlitku zůstává síťko pevně uvězněno mezi odlitým kovem, se kterým se pak vrací zpět k recyklaci, což může vést k nepřipustnému navýšení prvků železa v tavenině. [14]



Obr.27 různé typy kovových sítok [14]

- Tkaninové filtry (obr.28): Tyto filtry jsou utkány ze žáruvzdorných tkanin do podoby zhruba stejné, jako kovová síťka. jednotlivá vlákna mřížky filtru jsou v bodech styku spletena podobně jako je tomu u provazu. Filtry se vzájemně liší velikostí ok, profilem a tloušťkou vláken spletených do jednotlivých pramenů. Materiálem filtrů je amorfni SiO_2 o čistotě 97-99 %. Pro zlepšení filtrační účinnosti může být textilie filtru aktivována napuštěním speciální pryskyřicí, což snižuje povrchové napětí mezi vlákny filtru a vměstkou. Velikost ok filtru se volí s ohledem na odlévání materiál, obvykle v rozpětí 1-2 mm. Velikost filtrů se volí tak, aby filtr na každé straně přečnival průřez vtokové soustavy alespoň o 10-15 mm. Tkaninové filtry mají nízkou tepelnou kapacitu, proto je možné v jedné formě umístit i několik filtrů na různých místech. To umožňuje např. na prvním filtru zachytit nečistoty, které do formy vstupují s tekutým kovem a na dalších filtrech odstranit drobnější vměstky, které vznikly při proudění ve vtokové soustavě. Mohou být použity také jako pomocný prostředek pro snadné urážení nálitků od vlastního tělesa odlitku. Tento typ filtrů je vysoce vhodný pro odlévání metodou přesného lití na vytavitelný model, neboť filtry ve tvaru "košíku" lze snadno vložit do vtokové soustavy. [10], [11]

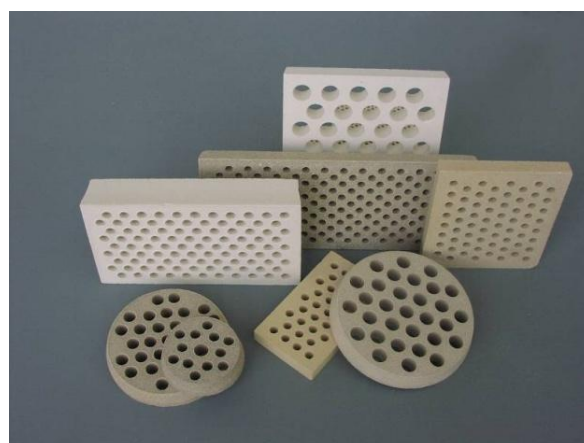


Obr.28 různé typy tkaninových filtrů [15]

2.3.2 Objemové filtry

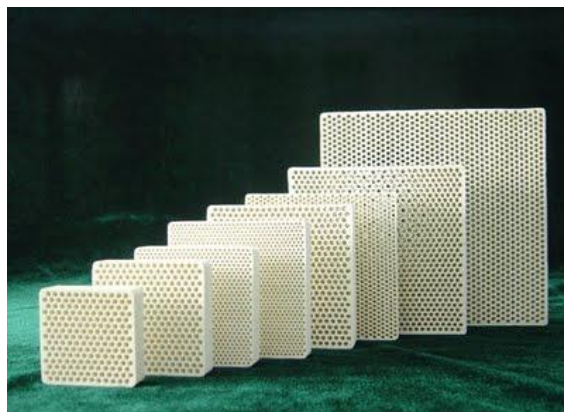
Využití objemových filtrů je na přítokové straně a schopnosti hloubkové filtrace. Tato schopnost je rozdílná podle velikosti otvorů, jejich průřezu, geometrického uspořádání a rovněž v závislosti na materiálu filtru. Její typická tloušťka je obvykle 11–50 mm. Dělí se do následujících kategorií:

- Licí síťka (obr.29): Jsou to keramická tělíska s přímými kruhovými otvory o velikosti obvykle v rozmezí \varnothing 4-10 mm, s tloušťkou 6-20 mm. Bývají umístěna většinou v osazení na dně vtokové jamky v přechodu do vtokového kúlu a jejich účelem je v první řadě zachycení primární strusky na počátku lití, kdy je jamka nezaplňena. Vměstky se zachycují pouze mechanismem cezení, účinky hloubkové filtrace jsou zanedbatelné. Vedle zachycování hrubých nečistot mají i další příznivé účinky. Urychlují zaplnění vtokové jamky, zamezují vzniku vírů nad vtokovým kúlem a omezují turbulenci kovu. Cedítka mohou sloužit také jako pomocný element pro aplikaci očkovačla přímo do formy.



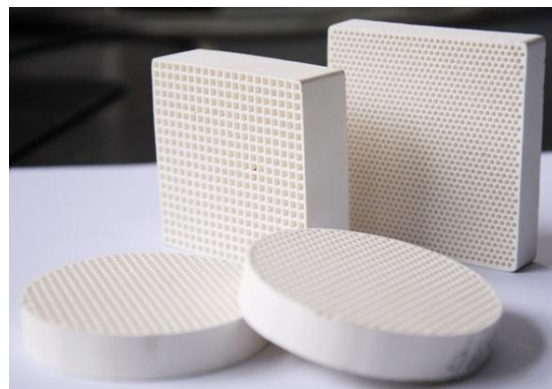
Obr.29 různé typy licích sítok [11]

- Lisované filtry (obr.30): Jsou vyráběny lisováním na stejném principu jako cedítka, ale vyznačují se větší šířkou (většinou 10-22 mm) a menším průměrem kruhových otvorů ($\varnothing 1-3$ mm). Vedle mechanismu účinnějšího cedění menších částic a principu tvorby filtračního koláče, lze zaznamenat i existenci hloubkové filtrace, která je přímo závislá na vnitřním povrchu otvorů, který přichází do styku s taveninou. Výhodou tohoto typu filtrů je jejich nízká cena, vysoká přesnost a mechanická pevnost. Nevýhodou je jejich nižší filtrační účinnost, vysoká tepelná kapacita, vysoká objemová hmotnost a nízká variabilita výroby, omezená existencí lisovacího nástroje.



Obr.30 různé typy lisovaných filtrů [16]

- Extrudované filtry (obr.31): Jsou vyráběny technologií tažením z plastické keramické hmoty. Díky této technologii lze vyrábět filtry s nízkou tloušťkou stěny a s vhodnějším tvarem otvorů (čtverec, trojúhelník), které mají svým charakterem větší a účinnější činnou plochu pro zachycení vměstků „hloubkovou filtrací“. Oproti lisovaným filtrům mají také nižší tepelnou kapacitu, vyšší licí kapacitu, ale ztrácí svoji přesnost a mechanickou



Obr.31 typy extrudovaných filtrů [17]

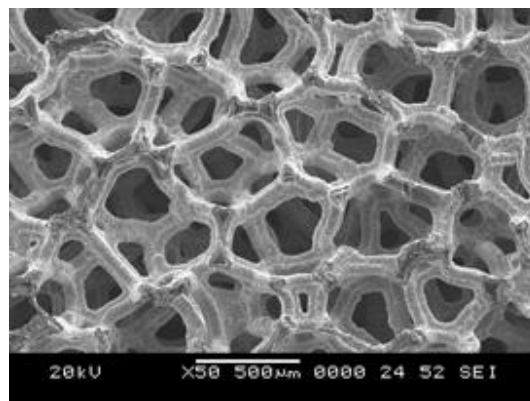
- pevnost. Tvarový sortiment filtrů je omezen na existenci protlačovacího nástroje, proto i variabilita výroby je na nízké úrovni. Stejně jako u licích sítok, tak i u filtrů je důležitou charakteristikou poměr průtočné plochy k ploše celkové. Část plochy, tvořená keramikou omezuje průtočný průřez. Jestliže nemá být proud kovu filtrem seškrcen, je nutné, aby průřez filtru byl oproti průřezu vtokového kanálu přiměřeně zvětšen, a to nejméně tak, aby celkový průtočný průřez otvorů se rovnal řídicímu průřezu vtokové soustavy.

- Pěnové keramické filtry (obr.32): Nejvíce rozšířeným druhem filtrů jsou keramické pěnové filtry. Tyto filtry jsou tvořeny otevřeným systémem vzájemně propojených buněk tvaru patnáctistěnu (obr.33). Prouděním kovu v pěnovém filtru dochází ke vzniku místních vírů a k častým změnám směru, v důsledku nichž vměstky přichází do častého kontaktu se stěnami filtru, na kterých ulpívají. Tento systém je výhodný zejména pro hloubkovou filtraci, kde lze účinně odstranit i velmi drobné vměstky až do velikosti 1-5 μm . Vměstky, jejichž rozměry jsou podstatně menší, než

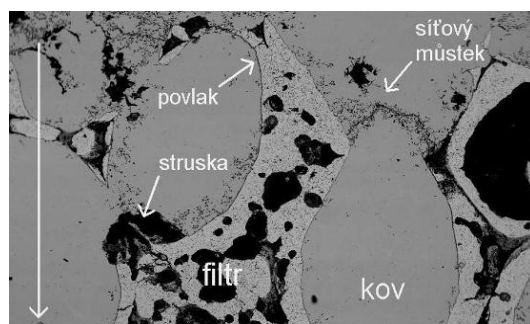


Obr.32 různé typy pěnových filtrů [11]

jsou rozměry pórů jsou tak zachycovány na stěnách a zachycují se i vzájemně, takže tvoří „mosty“, zakotvené na stěnách filtru (obr.34). S tím, jak se množství takto zachycených vměstků zvyšuje, se filtr postupně ucpává, až se stane neprůtočný. Průtočná kapacita filtru tak závisí na množství vměstků, velikosti pórů a na adhesních silách mezi jednotlivými vměstky a filtrem (tj. závisí na materiálu filtru). Vysoká účinnost hloubkové filtrace, jsou nejpodstatnější výhodou pěnových filtrů ve srovnání se všemi ostatními typy. Na hloubkové filtraci se podílí celá tloušťka filtru – čím větší tloušťka filtru, tím účinnější je filtrace. Tloušťka pěnových filtrů bývá obvykle v rozmezí 12-50 mm. Mezi další výhody filtrů patří vysoká variabilita výroby. Na základě zvoleného provedení filtru pak lze použít filtry mechanicky velice pevné, filtry s nízkou objemovou hmotností, nízkou tepelnou kapacitou, vysokou žáruvzdorností, s vysokým filtračním účinkem, vysokou licí kapacitou i nízkou cenou v závislosti na jejich použití, různých rozměrů a tvarů. [10], [11]



Obr.33 mikroskopický snímek buněk filtru [11]



Obr.34 Průběh filtrace v pěnovém filtru [11]

2.4 POŽADAVKY KLADENÉ NA FILTRY [10], [18]

Mezi hlavní požadavky kladené na filtry patří:

- Průtočnost: Je přímo spjatá s odporem filtru, udává se v [kg/s]. Velikost průtočnosti závisí na provozních podmínkách jako například na typu vtokové soustavy, výšce lití, teplotě taveniny nebo druhu slitiny. V praxi tedy nelze průtočnost zobecňovat, protože její hodnota se liší případ od případu. [10]
- Filtrační kapacita: Značí množství kovu, který proteče filtrem předtím, než dojde k ucpání filtru, nebo k výraznému omezení průtoku kovu přes filtr. Udává se v [kg/cm²] a lze ji určit podle hmotnosti odlitku. [10]
- Pevnost (za studena a za tepla): Během vlévání tekutého kovu na filtr dochází na jeho povrchu k prudkým teplotním změnám, a proto filtr musí splňovat určité podmínky pevnosti za tepla. Důsledkem těchto teplotních změn dochází ve filtru k nárůstu vnitřního pnutí, kterému musí materiál filtru odolat. Filtr musí také odolat prvotnímu nárazu kovu. Pro dopravu a manipulaci je zase důležitá pevnost filtru za studena, kdyby byla malá, mohlo by totiž dojít k odlomení nebo uvolnění části filtru. Takováto uvolněná část by pak mohla být odplavena do dutiny formy. [11]
- Nízká tepelná kapacita: Filtr ve vtokové soustavě funguje nejen jako hydraulický ale také jako tepelný odpor. Pomocí rovnice (2.3.1) lze vyjádřit množství tepla, které filtr kovu odebere. [11]

$$Q_f = m_f \times c_f \times (t_k - t_o) \text{ [J]} \quad (2.3.1)$$

Kde m_f hmotnost keramického filtru [kg]
 c_f měrná tepelná kapacita filtru [J/kg.K]
 t_k teplota kovu [°C]
 t_o počáteční teplota filtru [°C]

V případě nadměrného odběru tepla filtrem by mohlo dojít k rozdílným vadám způsobeným "studeným" kovem, nebo i k "zamrznutí" kovu ve filtru. [11]

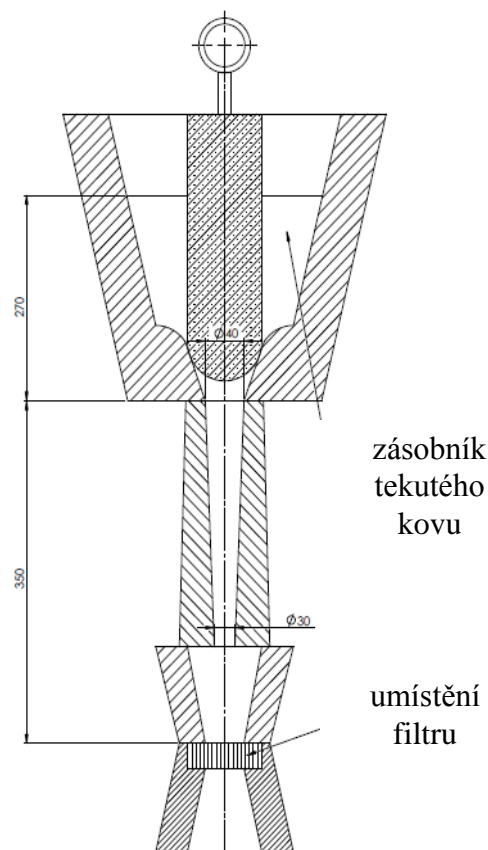
- Dobrá filtrační účinnost: Lze obecně vyjádřit vztahem (2.3.2) [10]

$$\mu = \frac{c_{vstup} - c_{výstup}}{c_{vstup}} \times 100 \text{ [%]} \quad (2.3.2)$$

Prakticky je hodnocení množství vměstků přítomných v tavenině velice složité, a z toho důvodu ani určení účinnosti filtrace není zcela přesné. [10]

- Nákladnost: Pokud filtr splňuje všechny požadavky na něj kladené, měl by také být pro slévárnu cenově přijatelný, a měl by jí přinášet ekonomické výhody. [11]

Jedinou spolehlivou metodou zkoušející, zda filtry splňují všechny výše uvedené požadavky, jsou experimentální testy. Principem těchto zkoušek je v protečení určitého množství tekutého kovu skrze filtr za určitých podmínek, provádějí se na speciálních testovacích sestavách (obr.35). Tyto zkoušky jsou následně vyhodnoceny a na jejich základě se určí zda filtr splňuje nebo nesplňuje dané požadavky. [10], [11]



Obr.35 testovací sestava [10]

2.5 MATERIÁLY KERAMICKÝCH FILTRŮ[10]

Prostředí tekutého kovu klade vysoké nároky na kvalitu filtru a může vést až k předčasnému znehodnocení filtru během odlévání. Filtr je namáhán především teplotním šokem a dynamickým rázem při prvním styku s taveninou. Dále na něj působí vysoká teplota po celou dobu lití, dlouhodobé mechanické namáhání za těchto vysokých teplot pak může způsobovat vznik creepu. Hydraulické síly způsobují erozi filtru a struska působí korozně. Druhy keramiky používané pro jednotlivé typy filtrů:

- lisované filtry: pro kovy a slitiny s nižší teplotou tavení se využívá materiál jménem Pyrostat, který se skládá z 50 % SiO_2 a 40 % Al_2O_3 . Pro odlévání za vyšších teplot slouží filtry s vyšším poměrem Al_2O_3 kupříkladu 3 $\text{Al}_2\text{O}_3, 2 \text{SiO}_2$.

- extrudované filtry:

tab.1[10]

kordierit + mullit	do 1450°C	hliník, slitiny mědi, oceli k lití
mullit + korund	do 1500°C	oceli k lití nad 1550°C
zirkon + spinell	do 1870°C	superslitiny, ocel-skořepinové formy

- pěnové filtry:

tab.2[10]

chemické složení	maximální pracovní teplota (°C)	odolnost vůči teplotnímu šoku	odolnost vůči strusce	odolnost vůči vzniku creepu	oblasti aplikace
Al_2O_3	1200-1450	špatná	dobrá	střední	hliník
3 Al_2O_3 - 2 SiO_2	1650	dobrá	špatná	výborná	oceli k lití, neželezné superslitiny
65% ZrO_2 +35% Al_2O_3	1600	výborná	dobrá	střední	železné a neželezné slitiny, superslitiny
97% ZrO_2 + 3% MgO (Y_2O_3)	1700	výborná	výborná	střední	ocel, nikl
$\text{SiC} - \text{Al}_2\text{O}_3$	1600	výborná	střední	střední	slitiny mědi, oceli k lití

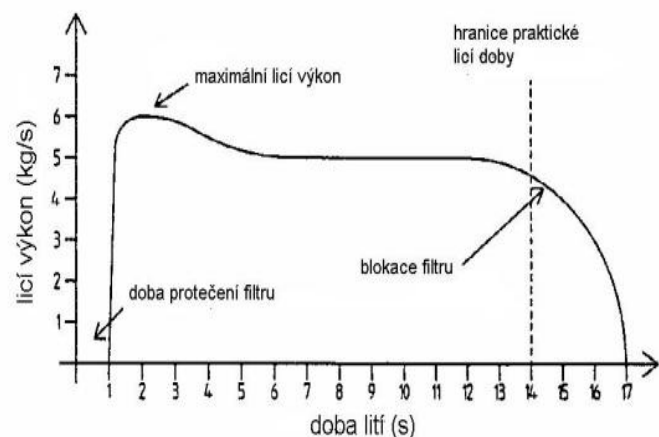
2.6 VLIV FILTRŮ NA TOK KOVU [10]

Důležitou vlastností filtrů je nejen jejich schopnost zachycovat vměstky obsažené v tavenině ale také schopnost usměrňovat a zklidňovat tok kovu ve vtokové soustavě.

2.6.1 Kontrola licí rychlosti

Použití filtru ve vtokové soustavě způsobuje nekonzistentní průtok kovu vtokovou soustavou. Závislost rychlosti lití na době lití lze vidět na obr.36, licí časy lze obecně rozdělit na:

- o prvotní protečení filtru (priming) - Během tohoto období dochází k prvotnímu protečení tekutého kovu filtrem. Tato část se skládá z období, ve kterém dochází k prvnímu kontaktu povrchu filtru s tekutým kovem. Vzhledem k obvykle malým velikostem otvorů filtru dochází k silnému působení kapilárních jevů. Odpor filtru vůči protečení lze vypočítat pomocí vzorce (2.4.1). Protože filtr obvykle není smáčitelný roztaveným kovem, dochází ve filtru ke kapilárnímu smršťování (obr.37), které zabraňuje průtoku kovu.



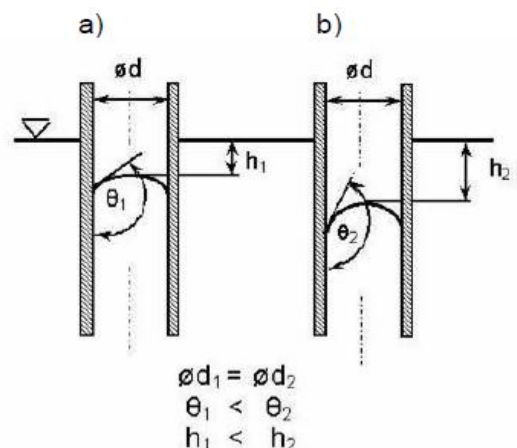
Obr.36 graf závislosti licí rychlosti na čase [10]

$$\text{odpor proti prvotnímu protečení} = \frac{\sigma_{KF} \times \cos\theta}{d \times \rho} \quad (2.5.1)$$

- kde: σ_{KF} - povrchové napětí kovu
 θ - úhel smáčení
 d - průměr toku kovu
 ρ - hustota kovu

Čím nižší je smáčivost filtru a velikost děr filtru, tím vyšší je odpor kapilárních sil. Toto může představovat problém především u filtrů s malými otvory v případě nízké výšky lití nebo relativně nízké teploty odlévaného kovu.

- o kontinuální protékání filtrem - Roztavený kov vyplňuje celý objem filtru. Je potřeba velké množství energie k překonání odporu vůči protečení.



- a) lepší smáčivost - nižší odpor
 b) horší smáčivost - vyšší odpor

Obr.37 odpor vůči prvotnímu protečení [10]

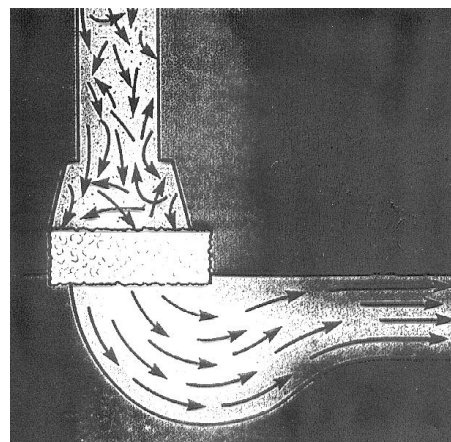
2.6.2 Usměrnění toku kovu

Zejména vtokový kůl, který je součástí vtokové soustavy, je doprovázen velmi intenzivním vířením. Toto víření je nežádoucí, jelikož způsobuje erozi stěn formy a oxidaci kovu, jejímž důsledkem je vznik vměstků a strhávání vzduchu. Způsob proudění je závislý na rychlosti proudění, druhu kovu, tvaru vtokové soustavy a na změnách směru proudu kovu. Charakter proudění je popsán Reynoldsovým číslem (2.5.2):

$$Re = \frac{w \times Dh}{\nu} \quad (2.5.2)$$

Kde: w - rychlost proudění
 Dh - hydraulický průměr kanálu
 ν - kinematická viskozita kovu

Jestliže se hodnota Re zvýší, zvýší se i víření kovu (tzn. víření je intenzivnější). Je-li $Re < 3000$, je proudění laminární s minimálním nebezpečím eroze. Při $Re > 15\,000 - 20\,000$ je již zcela turbulentní a dochází k víření v celém průřezu kanálu. Bez použití filtru je kov při lití takřka vždy výrazně turbulentní. Zavedení filtru tedy příznivě pomáhá snížit hodnotu Reynoldsova čísla a s ním i rozsah turbulence. Díky podstatně menšímu hydraulickému průměru kanálů filtru oproti kanálům vtokové soustavy, se zmenší hodnota Re a tím i rozsah turbulence viz. obr. 38. Např., je-li průměr vtokového kůlu 20 mm a průměr otvoru ve filtru 1 mm, sníží se hodnota Reynoldsova čísla 20 krát. Je pochopitelné, že po určité vzdálenosti od filtru turbulence opět nastává, avšak obvykle v menším rozsahu, než před ním.



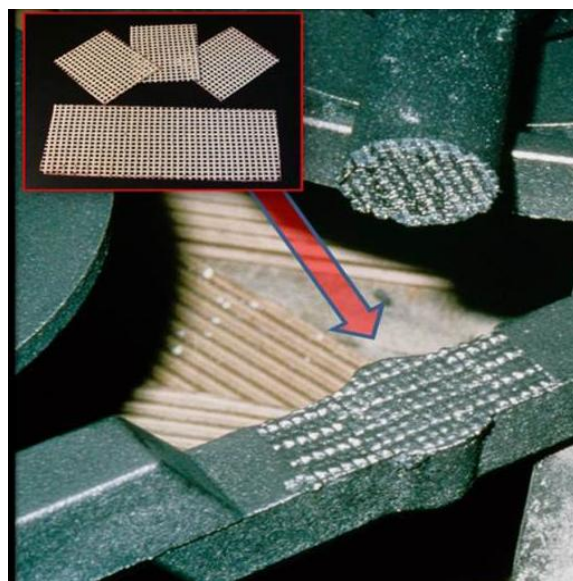
Obr.38 změna turbulentního na laminární tok [10]

2.7 USNADNĚNÍ ODSTRAŇOVÁNÍ VTKOVÉ SOUSTAVY [19]

Jedním z nejstarších použití zejména plochých filtrů je zlepšení odstraňování zbytků vtokové soustavy po odlití. Při vhodném umístění filtru ve vtokové soustavě, lze po odlití celou soustavu odstranit uražením pneumatickými kladivy nebo pomocí hydraulického lisu, namísto dražšího odstraňování řezáním pomocí řezných kotoučů nebo řezání plamenem. Ideální je umístění plochého filtru co nejbližší samotného odlitku. Výsledná plocha po uražení vtokové soustavy (obr.39) má dostatečně malou drsnost, čímž snižuje nebo dokonce odstraňuje požadavky na dokončovací operace za účelem zlepšení kvality povrchu odlitku. Proveditelnost této operace závisí na:

- houževnatosti slitin
- odolnosti odlitku proti rázům

Pomocí použití levného látkového nebo kovového plochého filtru lze docílit snížení doby odstraňování vtokové soustavy z 4-5 minut na několik sekund, což se při velkých sériích příznivě projevuje v nákladech.



Obr.39 plocha po uražení vtokové soustavy [19]

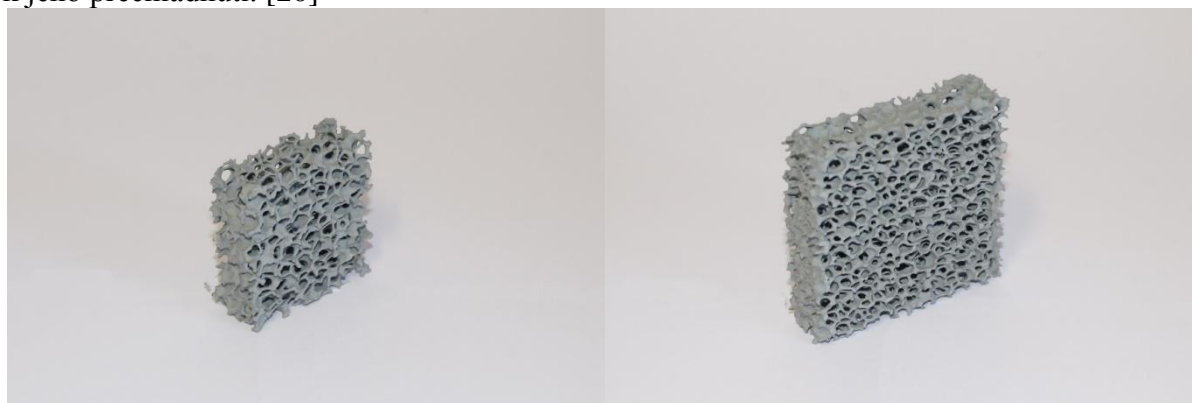
2.8 VOLBA VHODNÉ HUSTOTY PĚNOVÉHO KERAMICKÉHO FILTRU

Hustota filtru má jednotku [ppi], která je zkratkou anglického "pores per linear inch", neboli počet pórů nebo buněk na čtvereční palec. Povrchová plocha keramického pěnového filtru by měla být minimálně šestinásobná oproti velikosti vtoku. Tři hlavní velikosti poretivity filtrů jsou 10ppi (hrubá), 15ppi (střední) a 25ppi (přesná) viz. obr.40. Velikost poretivity se mění s každým druhem odlévaného kovu, ale mezi hlavní faktory výběru patří zejména:

- čistota taveniny před filtrací
- požadavky na čistotu odlitku
- velikost volného prostoru na modelovém zařízení
- požadavky na tok kovu [18], [19]

Pro většinu odlitků z šedé litiny jsou adekvátní filtry s poretivou 15ppi. Pro většinu odlitků z tvárné litiny jsou ideální filtry s poretivou 10ppi a 15ppi, z důvodu zvýšeného množství vměstků obsažených v tvárné litině. Pro hliníkové slitiny se využívají filtry s poretivou 10ppi. U většiny odlitků z oceli se využívá filtrů poretivity 15ppi. Při výrobě turbín a v letectví a kosmonautice se z důvodu požadavků na větší kvalitu odlitků využívá filtrů s poretivou 25ppi. Na odlitky z mědi a jejích slitin se používají filtry s poretivou 10ppi a 15ppi. [10], [19]

Důležitou charakteristikou filtrů je jejich filtrační kapacita a odolnost proti zamrznání. Zamrznáním se myslí schopnost filtru usměrnit tok kovu tak aby nikde v soustavě nedocházelo k jeho přechladnutí. [20]



a)

b)



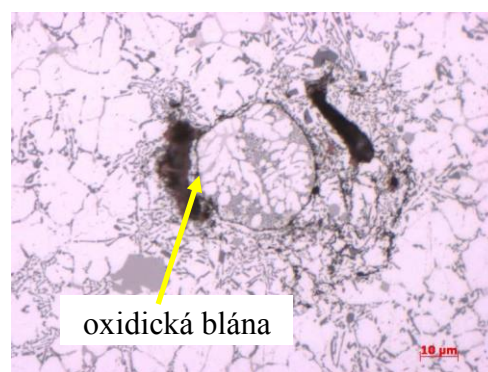
a) 10 ppi b) 15 ppi c) 20 ppi

Obr. 40 různé hustoty pěnových keramických filtrů [11]

3 NEGATIVNÍ VLIV VMĚSTKŮ V ODLITKU

Jedním ze základních důvodů používání filtrů ve slévárenství je jejich schopnost zachytit nečistoty obsažené v tekutém kovu, neboli vměstky. Přítomnost respektive množství vměstků (makro a mikrovmestků) obsažené v tekutém kovu je nepřímo úměrné jakosti odlitku, neboli čím více vměstků je v tavenině obsaženo tím horší je kvalita výsledného odlitku. Vmeštky v železných materiálech vznikají při vlastním výrobním provozu a jsou jeho neoddelitelnou součástí. Vmeštky lze obecně rozdělit na mikrovmeštky (důsledek reakce mezi prvky taveniny a kyslíkem) a makrovmeštky (vznikají v důsledku reoxidace, zahlcení strusky nebo erozí žáruvzdorných materiálů během odlévání). Mezi hlavní negativní vlivy vměstků v odlitku patří především: [10]

- Zhoršení mechanických vlastností: přítomnost vměstků narušuje uspořádání kovové mřížky slitiny. Důsledkem je snížení mechanických vlastností, zejména únavové pevnosti. Důležité je množství těchto vměstků a jejich velikost, případně i tvar. Velmi negativně působícími vměstky jsou ty, které tvoří tzv. oxidické blány (obr.41), dále vměstky tvořící síťoví na hranicích zrn a ostrohranné vměstky. [10]



Obr.41 metalograf. výbrus - 500 [21]

- Zhoršení obrobitelnosti: většina nekovových vměstků má vyšší tvrdost, než základní slitina. Toto platí jak u slitin hliníku, kde jsou vměstky tvořeny převážně tvrdými oxidy hliníku, jako je například korund (obr.42), tak u všech dalších slitin. Následkem špatné obrobitelnosti je horší kvalita obrobené plochy i kratší životnost obráběných strojů. [22]
- Vznik pomezity (bublinatosti): vměstek může chemicky reagovat s kovem za vzniku plynu a způsobit tak bubliny (obr.43), které se mohou vyskytovat jednotlivě nebo mohou tvořit hnízda. Dalším případem je vměstek sloužící jako vhodný zárodek pro nukleaci bublin během tuhnutí. [23]



Obr.42 korundový vměstek na povrchu součásti [22]

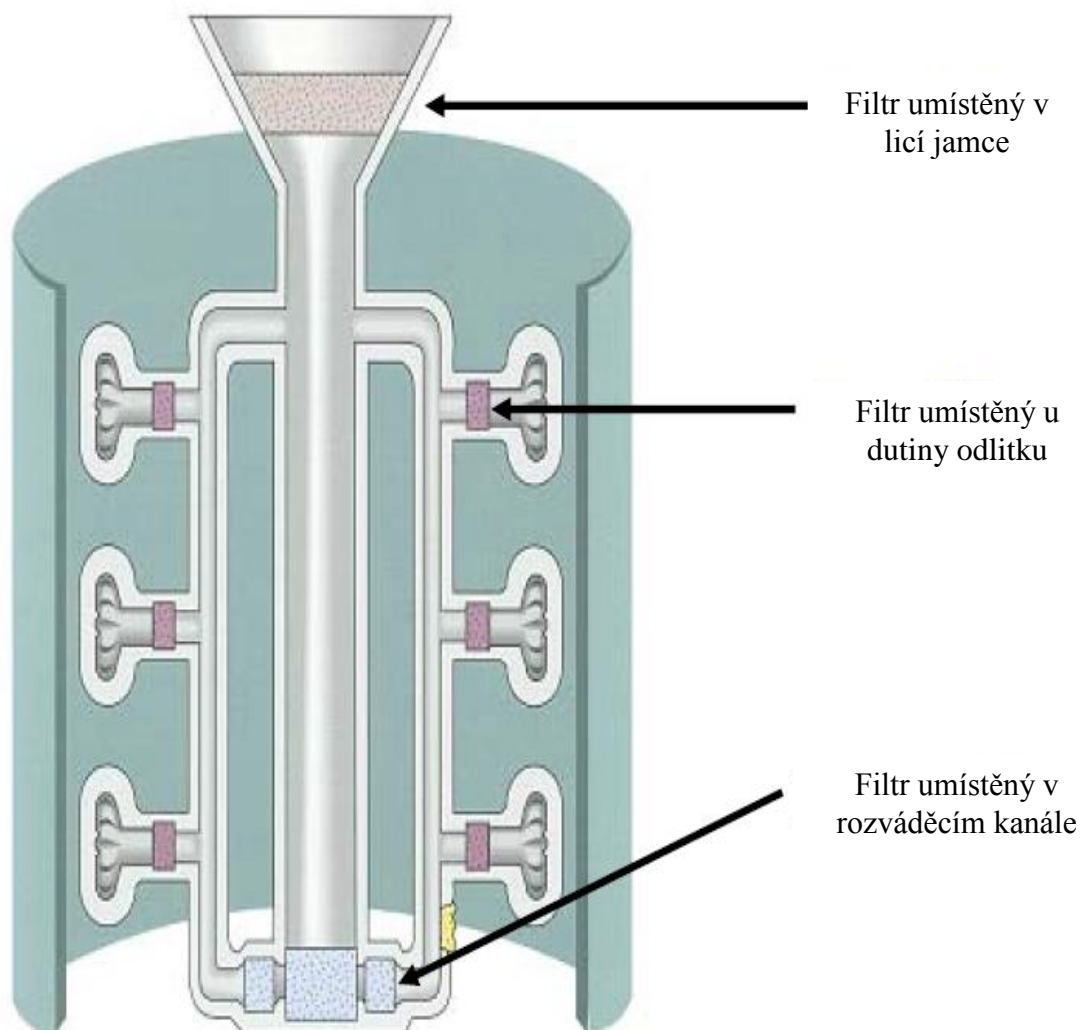


Obr.43 příklad bubliny v odlitku [23]

4 MOŽNOSTI UMÍSTĚNÍ FILTRŮ U METODY PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

I přestože použití filtrů při přesném lití na vytavitelný model se obvykle liší od jejich použití při gravitačním lití do písku, základní principy umisťování jsou podobné. To znamená, že zásady umisťování filtrů využívané u gravitačního lití, lze využít i u přesného lití na vytavitelný model. Ve skutečnosti, některé návrhy vtokových soustav používané při lití do písku jsou velice podobné typům vtokových soustav používaných u přesného lití. Například udržení a kontrola požadovaného toku kovu do vtokového kanálu formy je prvním z úkolů při redukci turbulencí u všech vtokových soustav. Vzhledem k mnohem většímu množství možných licích výšek, výsledných rozměrů odlitků, licích časů a typů forem, lze u lití do písku využívat více možností ke kontrole a usměrňování toku roztaveného kovu. Naopak tyto možnosti jsou omezené u přesného lití na vytavitelný model. [19], [24]

Základními pozicemi pro umístění filtrů u metody přesného lití, je umístění filtru v licí jamce, jeho umístění v blízkosti dutiny budoucího odlitku, nebo umístění filtru v rozváděcím kanále, viz. obr.44. [24]



Obr.44 příklady typických pozic filtrů [24]

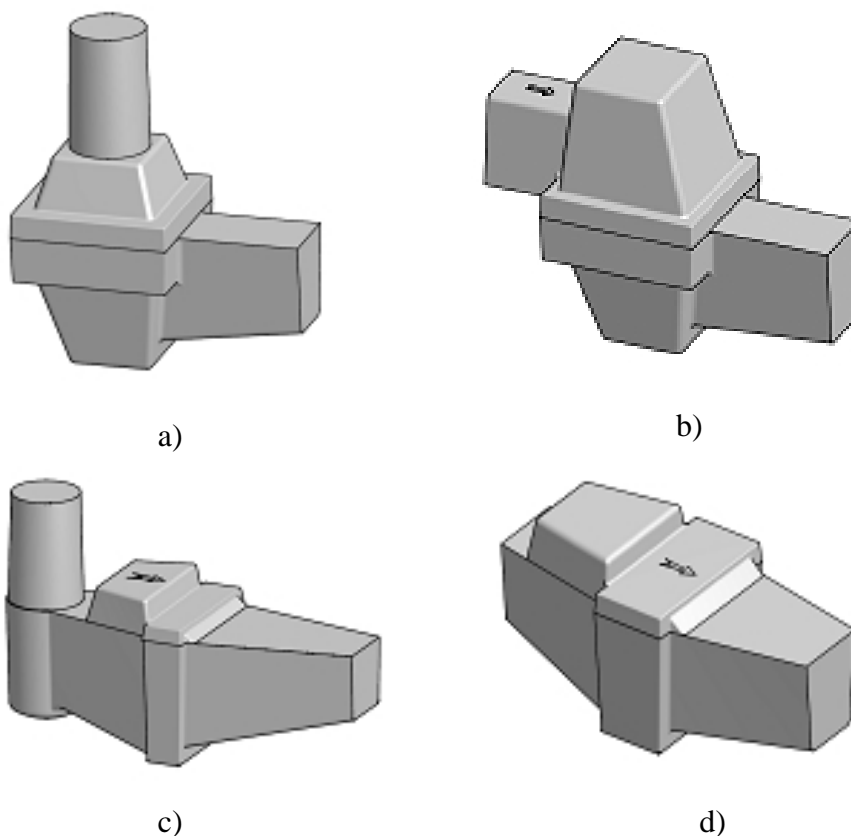
4.1 UMÍSTĚNÍ FILTRU VE VTOKOVÉ SOUSTAVĚ

Různé možnosti umístění filtru ve vtokové soustavě použitelné jak pro přesné lití, tak pro lití do písku se dělí podle konfigurace na:

- Přímé lití: Při této odlévací konfiguraci dochází k lití kovu přímo na povrch filtru, čímž dochází k podpoře protékání kovu filtrem. Nevýhodou je větší náchylnost k porušení filtru vlivem tlaku čela kovu, může také rychleji dojít k zanesení filtru, pokud tekutý kov vnáší do vtokové soustavy velké množství oxidických blan.
- Nepřímé lití: U této konfigurace se zásobník kovu nachází těsně nad nebo před filtrem, čímž dochází k přehřevu filtru a tím snížení průtočné pauzy. Blány a vměstky stoupají vzhůru k povrchu vtokové soustavy, čímž se snižuje rychlost zanášení filtru. Tato konfigurace je ovšem výhodná pouze pro těžší odlitky, protože se využívá velké vtokové soustavy. [19]

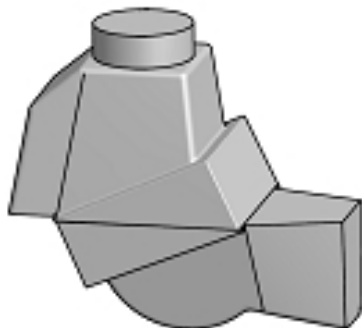
Dále se dělí podle natočení filtru na vodorovné nebo svislé (tato pozice filtru snižuje velikost tlaku způsobeného čelem kovu oproti horizontálnímu umístění ale nevýhodou je větší náročnost na přesnost umístění filtru) a na umístění pod vtokovým kulem nebo v rozváděcím kanále. Kombinacemi různých natočení filtru a konfigurací získáváme základní typy umístění filtru:

- Vodorovné umístění - pod vtokovým kulem, přímé lití (obr.45a)
- Vodorovné umístění - v rozváděcím kanále, nepřímé lití (obr.45b)
- Svislé umístění - pod vtokovým kulem, nepřímé lití (obr.45c)
- Svislé umístění - v rozváděcím kanále, nepřímé lití (obr.45d)

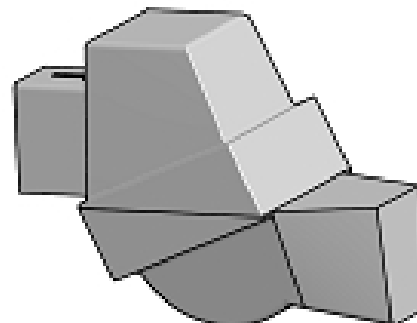


Obr.45 základní typy umístění filtrů [11]

- Šikmé umístění - pod vtokovým kulem, přímé lití (obr.46)
- Šikmé umístění filtru - v rozváděcím kanále, nepřímé lití (obr.47) [11], [19]



Obr.46 šikmé umístění filtru - pod vtokovým kulem [11]



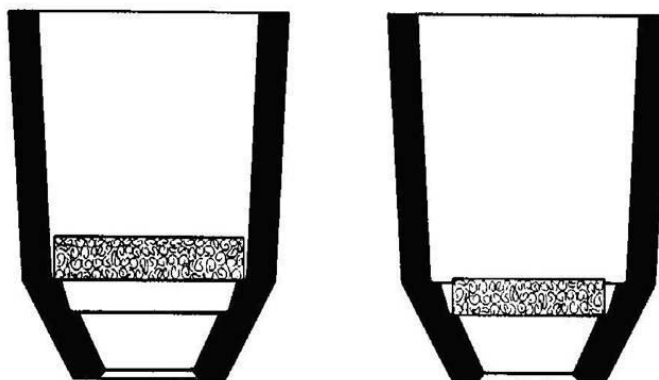
Obr.47 šikmé umístění filtru - v rozváděcím kanále [11]

4.2 UMÍSTĚNÍ FILTRU V LICÍ JAMCE

Jedná se o konfiguraci přímého lití na filtr. Filtr je obvykle zabudovaný ve spodní straně licí jamky, kde slouží jako licí základna. U lití do pískových forem, použití tohoto systému nahrazuje složitou vtokovou soustavu. Mezi výhody tohoto umístění u metody přesného lití i u metody lití do pískových forem se řadí :

- řízené tuhnutí
- vysoké využití roztaveného kovu
- vysoké využití plochy rámu
- nízké pořizovací náklady [10]

Filtr se umísťuje volně do vybrání, předem připraveného na spodní straně licí jamky, nebo se do této pozice umísťuje již ve fázi voskového modelu, a po vytavení vosku zůstává ve skořepině. Po skončení odlévání, dojde k vystoupení filtru k povrchu. Na obr.48 lze vidět návrh umístění filtru do vybrání na dně licí jamky, podporujícího dva rozměry filtru, které lze použít, v závislosti na požadovaném toku kovu. [10], [19]



Obr.48 umístění filtru v licí jamce [10]

Obdobně lze využít licí kelímky s textilními filtry. Rychlosti toku kovu u filtrů umístěných v licích jamkách mohou být o 20 - 30 % vyšší než-li těch umístěných ve vtokové soustavě. [10]

5 SPECIFIKA SPOJENÁ S FILTRACÍ U METODY PŘESNÉHO LITÍ

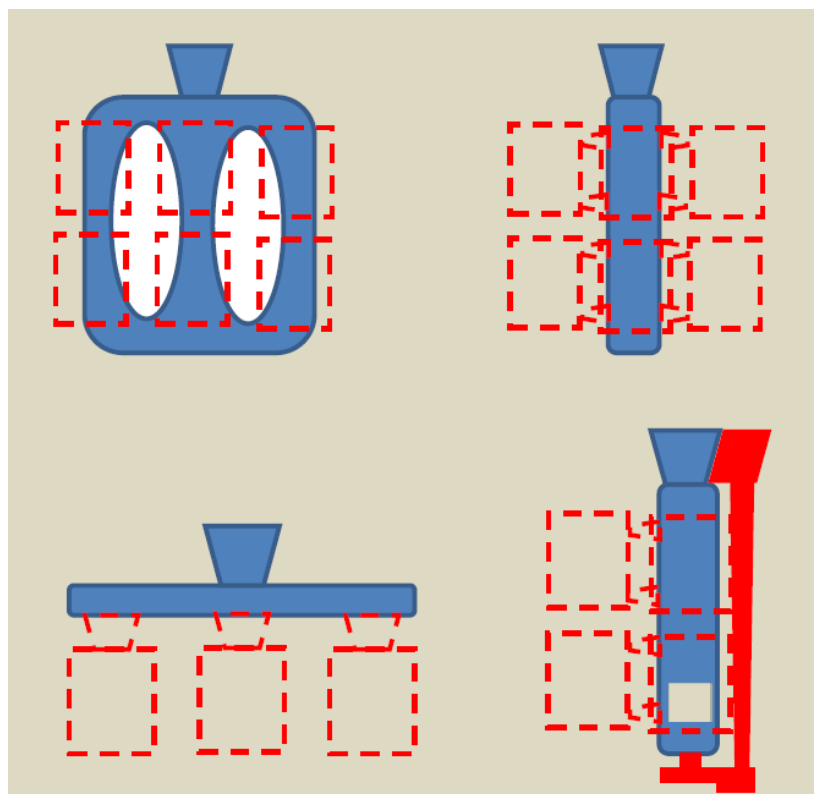
Při rozhodování o použití filtrů u metody přesného lití na vytavitelný model, je velké množství faktorů, které je nutné zohlednit. Mezi tyto faktory se řadí:

- cena
- snadnost použití
- filtrační kapacita
- efektivita

5.1 NÁVRH USPOŘADÁNÍ MODELŮ

Skořepiny u přesného lití na vytavitelný model jsou obvykle spojovány do stromečků, kromě případů kdy se odlévají velké a těžké součásti, které mají svoji vlastní vtokovou soustavu. Aby bylo zaručeno neporušení voskového modelu v průběhu obalování, je nutné, aby tyto modely dosahovaly dostatečné strukturální soudržnosti. Během návrhu stromečku je také nutné pamatovat na umístění filtru. Pro filtr je nutné vytvořit ve skořepině dutinu, do které bude později vložen, nebo může být filtr zakomponován již ve voskovém modelu. Několik nejčastějších designů stromečků které lze vidět na obr.49. Tyto typy uspořádání stromečků jsou nejčastější z důvodů nutnosti splnit požadavky na:

- odolnost: nutnost udržet si soudržnost během namáčecího procesu
- ekonomičnost: maximální množství odlitků litých zaráz [19]



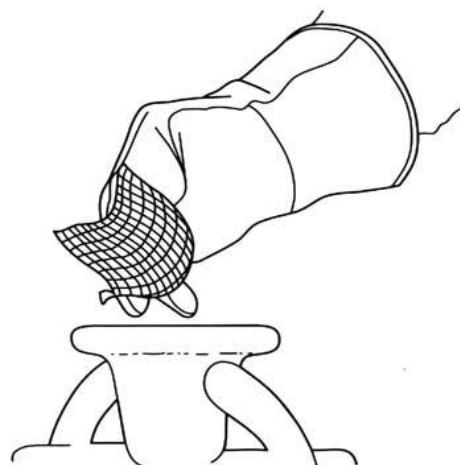
Obr.49 nejčastější designy stromečků [19]

Z pohledu toku kovu, ovšem všechny tyto designy mají sklony ke vzniku turbulentního toku během odlévání.

Návrhy stromečků, ve kterých se jednotlivé díly nachází přímo pod vtokovým kulem, obvykle generují nejvíce turbulentní plnění formy. Kov vtéká do horního kanálku, odtud se přelévá do rozváděcího kanálku. Protéká dále a vyplňuje dutiny jednotlivých odlitků, s velice náhlými přerušeními, která mohou vést až k "zamrznutí" kovu v některých částech skořepiny, spolu s reoxidačními vadami. [19]

5.2 MOŽNOSTI VKLÁDÁNÍ FILTRŮ DO SKOŘEPINY

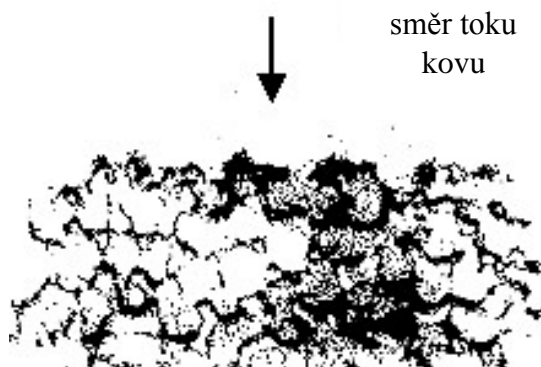
Vkládání filtrů u metody přesného lití na vytavitelný model, lze realizovat několika způsoby. Nejjednodušší možností je umístit filtr do dna licí jamky, čímž dojde ke snížení síly čela dopadajícího kovu, oproti umístění filtru do vtokového kůlu. K umístění filtru do dna licí jamky může dojít ručně, těsně před samotným odléváním (obr.50). Komplikovanější možností je umístit filtr do vtokové soustavy nebo jej zakomponovat už do voskového modelu odlitku, čímž po odstranění vosku dojde k uchycení filtru ve skořepině. V těchto případech je nutné dbát na dokonalé usazení filtru v pro něj vytvořené dutině, jinak hrozí nebezpečí pronikání vměstků kolem filtru do formy. Navíc dochází k nebezpečí poničení filtru při manipulaci nebo při vytavování vosku. [19]



Obr.50 ruční umístění textilního filtru do licí jamky [25]

5.3 ZVÝŠENÉ ZAHLCOVÁNÍ FILTRU

Nadměrné množství blan proudící do skořepiny může snadno zahltit filtr (obr.51) a snížit tak jeho průtočnost nebo dokonce zcela jej zablokovat. Toto může vést až ke zničení filtru vlivem zpětného tlaku. Porušení filtru může také vést ke vniku jeho částic do formy. V méně závažném případě, může dojít k částečnému omezení průtočnosti filtru. V důsledku čehož dojde k nedostatečnému zásobování formy tekutým kovem a tím ke vzniku staženin v kovu, vlivem nedostatku kovu. Řešením tohoto problému je zajistit lepší vstupní čistotu kovu a snížit velikost reoxidace ve vtokové soustavě. V některých případech lze použít filtr s rozměrnějšími póry (nižší filtrační efektivita), nebo lze navýšit filtrační plochu filtru. Další možností je použití více druhů filtrů za sebou, první s většími póry a s dalšími filtry s menšími póry aby se zajistila efektivita filtrace. Nicméně toto řešení negativně ovlivňuje průtočnost systémem. [10], [19]



Obr.51 postupné zahlcování pěnového keramického filtru vměstkou [11]

Dalším důvodem zahlcování filtru může být kov tuhnuící ve filtru, vlivem nedostatečného prohřátí. U metody přesného lití na vytavitelný model nejsou dopady nedostatečného prohřátí tak drastické, vlivem předehřátí celé skořepiny těsně před samotným odléváním. Teploty předehřevu skořepiny se ovšem pohybují pod teplotou solidu odlévané slitiny, takže při nízkých licích teplotách může docházet k problémům s prvotním protečením kovu filtrem (priming). V některých případech lze tyto problémy snížit použitím filtru s nižší hustotou. Navýšení průtočné plochy filtru také přispívá ke zvýšení průtočnosti. [10], [19]

5.4 VÝHODNOST POUŽITÍ FILTRŮ U TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Všechny druhy filtrů navýší licí cenu a tím i cenu odlitku. Otázkou tedy je, zda je použití filtrů výhodné. Mnoho sléváren se pokusilo využít filtry jako záchranný prostředek při nízké kvalitě výsledných odlitků. Toto zpravidla příliš nefunguje. Z ekonomického hlediska je v takovém případě výhodnější pokusit se napravit původní nedostatky výroby, které vedli ke zhoršení kvality v první řadě. Jakožto součást dobře navrženého vtokového systému, vede použití filtrů ve většině případů ke zvýšení kvality kovu v odlitku. Obecně lze říci, že filtr dokáže zlepšit průměrnou výrobu, ale nedokáže odstranit všechny nedostatky.

Za účelem snížení nákladů je také důležité používat filtry pouze tehdy, když je to nezbytné. Například pokud má zákazník neobvykle vysoké požadavky na kvalitu kovu v odlitku. Nejvhodnější je použít filtry u silně oxidujících slitin, jako například u hliníkových bronzů nebo u uhlíkových ocelí. [19]

5.5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SIMULACÍ U FILTRACE

V současnosti se rozšiřuje používání simulačních programů pro výpočty simulací. Využívají se programy jako MagmaSoft, SolidCAST, Flow3D, ProCAST, NovaCast atd. Tyto programy pomáhají a zefektivňují návrh vtokové soustavy, na základě simulace toku kovu formou. Tyto programy jsou velice náročné na výpočetní výkon, z důvodu velkého množství početních úkonů, které musí vykonat za účelem realistického zpracování simulace chování toku kovu během odlévání. Tyto výpočty se dále komplikují v případě použití filtrů, které výrazně ovlivňují vlastnosti toku kovu. Většina těchto programů také obsahuje pomocný podprogram, který návrhářům doporučí pozice pro umístění filtrů. [19]

ZÁVĚR

Tato závěrečná práce se zabývala literárním rozbohem problematiky filtrace tekutého kovu při odlévání do skořepinových forem u metody vytavitelného modelu, srovnáním různých typů filtrů a jejich optimálním umístěním ve vtokové soustavě. V úvodní části je obecně představena metoda vytavitelného modelu a její historie a výhled do budoucna.

Hlavní část této práce byla věnována problematice filtrace, nejprve obecnému popisu a historii, následně pak podrobněji jednotlivým filtračním mechanismům a jejich funkci. Dále v této části byly zmíněny podrobněji jednotlivé typy filtrů a jejich hlavní charakteristiky, včetně materiálů a jejich porovnání. V této části byla také zpracována problematika vlivu filtrů na odlitek, a to z několika hledisek. Závěrečnou částí této kapitoly pak byla kritéria a doporučení pro volbu vhodných parametrů filtru. Z této kapitoly plyne, že hlavními kritérii, kterými lze jednotlivé filtry posuzovat jsou:

- čistota a druh taveniny před filtrací
- požadavky na čistotu odlitku
- požadavky na tok kovu
- filtrační kapacita
- cena

V následujících částech byl probrán samotný důvod používání filtrace, v podobě negativních vlivů vměstků na odlitky a možnosti umístění filtrů ve vtokové soustavě. Bylo podrobně zpracováno několik základních typů umístění a jejich výhody a nevýhody.

Závěrečná část této práce se zabývala problémy spojenými s filtrací u metody přesného lití, jako například, kdy je výhodné u této metody filtrací použít, jaké výsledky lze od ní očekávat a jak lze řešit některé problémy, které mohou během výroby nastat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ :

- [1] BEELEY, P. R.; SMART, R. F. *Investment Casting*. 1 st ed. Cambridge, UK: The University Press, 1995. 486 s. ISBN 0-901716-66-9.
- [2] HORÁČEK, Milan. *Technologie vytavitelného modelu: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>>.
- [3] Investment (Lost Wax) Casting process. *American casting company* [online]. 2014 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://americancastingco.com/investment-casting-process/>
- [4] PAVELKA, Miroslav. Užité vlastnosti lití vytavitelným modelem. *Slévárenství: Časopis pro slévárenský průmysl*. Říjen 2001, XLIX, 10, s. 581-584. ISSN 0037-6825.
- [5] Věčný Benvenuto Cellini. *Čítárny.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.citarny.cz/index.php/nove-knihy/knihy-dospeli/biografie/5281-cellini>
- [6] HORÁČEK, Milan. *PRECAST* [online]. 2006. 2015, 46 s. [cit. 2015-05-27].
- [7] Investment Casting - History, Materials and The Future. *AZO materials* [online]. 2003, 2013 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2104>
- [8] Injection-Molded Ceramics for Investment Casting. *FOUNDRY management and technology* [online]. 2014 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://foundrymag.com/new-products/injection-molded-ceramics-investment-casting>
- [9] BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006, 175 s. ISBN 80-704-3491-0.
- [10] ROUČKA, Jaromír. *Příručka o filtraci*. Reprocentrum Blansko : Česká slévárenská společnost, Divadelní 6, 657 34 Brno, CR, 2000. 41s. ISBN 80-02-01389-1.
- [11] *Lánik foam ceramics* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.lanik.eu/>
- [12] Made-in-china [online]. 2005 [cit. 2015-04-21]. Molten Metal Filter. Dostupné z WWW: <<http://image.made-inchina.com/2f0j00nePEQavdHLqI/Molten-Metal-Filter.jpg>>
- [13] KVARTEX, spol. s r.o. *Katalog exovýrobků*. Rosovice: Kvartex, 2012. Dostupné z: http://www.kvartex.cz/download/verejne/exo_katalog_2013.pdf
- [14] *Pyrotek* [online]. 2015 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.pyrotek.info/>
- [15] New filter for molten metal pours. *Metal powder report* [online]. 2009 [cit. 2015-05-27] Dostupné z: <http://www.materialstoday.com/hardmetals-and-ceramics/news/new-filter-for-molten-metal-pours/>
- [16] Pressed ceramic filters. *Zhanyi foundry* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.ceramic-foam-filter.com/pressed-ceramic-filters/>
- [17] Extruded ceramic filter. *Ningxin new material* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.bdningxin.com/html_products/Extruded-ceramic-filter23.html#image_1
- [18] Ceramic filter. *How Products Are Made* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.madehow.com/Volume-5/Ceramic-Filter.html>

- [19] VOIGT, Robert C. Metal Filtration Strategies for Ferrous Investment Castings. *60th technical conference and expo 2013*. 2013, **2013**(60).
- [20] Meeting Customer Quality Specs. HITCHINGS, Jason. *Comanche Technologies* [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.comanchetechnologies.com/Documents/INCAST%20Filter%20Article%20Final%20Version%20May%20Issue.pdf>
- [21] HERMAN, Aleš. *PROBLEMATIKA ANALÝZY VSTUPNÍCH METALURGICKÝCH SUROVIN NA SLÉVÁRNĚ TLAKOVÉHO LITÍ*. Praha: ČVUT v Praze, 2012. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/48748/1/HermanA_Problematika_Analyzy_2012.pdf
- [22] FUOCO, R. aj. Characterizations of some types of oxide inclusion in aluminum alloy castings. In *Transaction AFS 1999*, s. 287-294.
- [23] Casting defects. *Association of backyard metalcasters* [online]. 2015 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: http://www.abymc.com/tmoranwms/Casting_Defects.html
- [24] WANG, Vincent. ASK CHEMICALS CO. *Introduction og Zirconia Foam Filter* [online]. 2013, 21 s. [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: <http://www.ask-chemicals.com/home.html>
- [25] Product performance. *Pyrotek* [online]. 1996 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.pyrotek.info/documents/datasheets/282_Product_Perf_Investment_Casting.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Význam	Jednotka
c	měrná tepelná kapacita	[J/kg.K]
d	průměr	[mm]
m	hmotnost	[kg]
Q	teplo	[J]
t	teplota	[°C]
WA	adhesivní síla	[N]
θ	úhel smáčení	[°]
μ	účinnost	[%]
ΔG	Gibsova volná energie	[J]
σ	mezifázová energie	[J]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Číslo	Název	Strana
Obr.1	Příklady výrobků vyrobených metodou lití na vytavitelný model	9
Obr.2	Výroba matečné formy	10
Obr.3	Výroba voskového modelu	10
Obr.4	Skládání stromečku	10
Obr.5	obalování modelů	11
Obr.6	Vytavování vosku	11
Obr.7	Odlévání na vzduchu	11
Obr.8	Otryskávání skořepiny	12
Obr.9	Dokončování broušením	12
Obr.10	Perseus s hlavou Medusy	12
Obr.11	Odlitky zbraní	13
Obr.12	Lopatky turbíny ze superslitiny	13
Obr.13	Součást sacího potrubí letadla	14
Obr.14	Umístění filtru ve vtokové soustavě	15
Obr.15	Různé druhy struskováků	15
Obr.16	Očkovací tělísko na filtru	15
Obr.17	Masivní lící jamka	16
Obr.18	Různé typy filtrů a sítěk	16
Obr.19	Exotermický nástavec	16
Obr.20	Mechanismus cezení	17
Obr.21	Zachycený shluk zrn formovací směsi	17
Obr.22	Tvorba filtračního koláče	17
Obr.23	Mústek z vměstků přes otvor ve filtru	17
Obr.24	Hloubková filtrace	18
Obr.25	Zrnko písku zachycené na stěně filtru	18
Obr.26	Smáčení filtru tekutým vměstkem	19
Obr.27	Různé typy kovových sítěk	19
Obr.28	Různé typy tkaninových filtrů	20
Obr.29	Různé typy licích sítěk	20
Obr.30	Různé typy lisovaných filtrů	21
Obr.31	Typy extrudovaných filtrů	21
Obr.32	Různé typy pěnových filtrů	21
Obr.33	Mikroskopický snímek buněk filtru	22
Obr.34	Průběh filtrace v pěnovém filtru	22
Obr.35	Testovací sestava	23
Obr.36	Graf závislosti lící rychlosti na čase	25
Obr.37	Odpor vůči prvotnímu protečení	25
Obr.38	Změna turbulentního na laminární tok	26
Obr.39	Plocha hladkého lomu po uražení vtokové soustavy	26
Obr.40	Různé hustoty pěnových keramických filtrů	27
Obr.41	Metalograf. výbrus	28
Obr.42	Korundový vměstek na povrchu součásti	28
Obr.43	Příklad bubliny v odlitku	28
Obr.44	Příklady typických pozic filtrů	29
Obr.45	Základní typy umístění filtrů	30
Obr.46	Šikmé umístění filtru - pod vtokovým kulem	31
Obr.47	Šikmé umístění filtru - v rozváděcím kanále	31

Obr.48	Umístění filtru v lici jamce	31
Obr.49	Nejčastější návrhy tvaru stromečků	32
Obr.50	Ruční umístění filtru do lici jamky	33
Obr.51	Postupné zahlcování pěnového keramického filtru vměstky	33

SEZNAM TABULEK

Číslo	Název	Strana
Tab.1	Extrudované filtry - materiály	24
Tab.2	Pěnové filtry - materiály	24

SEZNAM VZORCŮ

Číslo	Název	Strana
(2.2.1)	Metoda výpočtu Gibsovi volné energie	18
(2.2.2)	Metoda výpočtu velikosti adhesivní síly	18
(2.3.1)	Metoda výpočtu tepla odebíraného	23
(2.3.2)	Metoda výpočtu účinnosti	23
(2.5.1)	Metoda výpočtu odporu proti prvotnímu protečení	25
(2.5.2)	Metoda výpočtu Reynoldsova čísla	26