

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV FILTRŮ NA PLNĚNÍ FORMY PŘI ODLÉVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

INFLUENCE OF FILTERS ON RUNNING OF METAL FLOW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Makalouš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

BRNO 2008

Anotace

Tato studie se zabývá vlivem filtrů na plnění formy při odlévání slitin hliníku. Hlavním cílem práce bylo popsat hydraulické odpory různých druhů filtrů a průběh zanášení vměstkami. V teoretické části popisuje problematiku filtrace obecně, specifika filtrace hliníkových slitin a také hlavní charakteristiky vměstek vyskytujících se v hliníkových slitinách. Experimentální část se zabývá prolévacími zkouškami filtrů, vlivem filtrů na naplynění taveniny a metalografickým rozbohem. Bylo zjištěno, že nejmenší odpor pro dané podmínky lití tvoří ve vtokové soustavě filtr GEPHAL, naopak největší odpory tvořily pěnové keramické filtry typu LD. Pro studium průběhu zanášení vměstkami je třeba zmenšení průtočné plochy filtrů. Při metalografických zkouškách byly nalezeny vměstky typu oxidických blan, spinely $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO}$, kalové fáze i vměstky SiC.

Klíčová slova

filtr, hliníkové slitiny, vměstky, hydraulické odpory

Abstract

This study deals with influence of filters on running of aluminum metal flow. The main objective was to describe hydraulic resistances of assorted filters and running of silting filters by inclusions. Theoretical part generally describes filtration process and also filtration from the point of view of aluminum alloys and the most important characteristics of each type of alumina inclusions. Experimental part deals with flow rate tests, influence of filters on gassiness of melt and metallographic analysis. It was found out, that filter GEPHAL made minimal hydraulic resistance, on the other hand ceramic foam filters type LD made the maximal hydraulic resistance. It is necessary to reduce filtration surface for study running of silting filters by inclusions. Metallographic analysis showed amorphous alumina film inclusions, spinell $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO}$, sludge and carbide of silicon.

Key words

filter, aluminium alloys, inclusions, hydraulic resistances

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAKALOUŠ, J. Vliv filtrů na plnění formy při odlévání slitin hliníku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv filtrů na plnění formy při odlévání slitin hliníku vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 29.5 2008

.....
Jakub Makalouš

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

1 Úvod.....	9
2 Teoretická část.....	10
2.1 Siluminy	10
2.2 Slitiny Al-Si-Cu	10
2.2.1 Slitina AlSi9Cu3	11
2.2.1.1 Mechanické vlastnosti	11
2.2.1.2 Fyzikální vlastnosti	11
2.2.1.3 Licí vlastnosti	11
2.2.1.4 Použití	11
2.3 Vměstky ve slitinách hliníku	12
2.3.1 Původ vměstků	12
2.3.2 Zdroje vměstků	12
2.3.3 Typy vměstků ve slitinách hliníku	13
2.4 Rafinace taveniny	20
2.4.1 Vynášení vměstků plynovými bublinami	20
2.4.2 Krycí a rafinační přípravky	20
2.4.3 Filtrace	21
2.4.3.1 Filtrace cezením	22
2.4.3.2 Tvorba filtračního koláče	22
2.4.3.3 Hloubková filtrace	23
2.5 Filtry	24
2.5.1 Požadavky kladené na filtry	25
2.5.2 Druhy filtrů	26
2.5.2.1 Ploché filtry	26
2.5.2.2 Objemové filtry	28
2.5.3 Materiály filtrů	30
2.5.4 Poloha filtrů ve vtokové soustavě	30

3 Experimentální část.....	33
3.1 Cíl experimentu.....	33
3.2 Zkoušky průtočnosti filtrů	33
3.2.1 Použitá zařízení	33
3.2.2 Zkoušené filtry	35
3.2.3 Použité slitiny.....	38
3.2.4 Průběh měření.....	39
3.2.5 Naměřené hodnoty	40
3.2.5.1 Průběh průtoku kovu	40
3.2.5.2 Teplota taveniny	40
3.2.6 Vyhodnocení.....	41
3.2.6.1 slitina AlSi9Cu3	41
3.2.6.2 slitina AlSi12Cu	45
3.2.7 Vliv filtrů na dobu plnění formy.....	46
3.3 Vliv filtrace na naplynění taveniny.....	50
3.3.1 Použité zařízení	50
3.3.2 Postup měření	50
3.3.3 Naměřené hodnoty	51
3.4 Zkoušky průtočnosti filtrů se zmenšenou průtočnou plochou.....	53
3.4.1 Použitá zařízení	53
3.4.2 Zkoušené filtry	53
3.4.3 Použitá slitina.....	54
3.4.4 Průběh měření.....	54
3.4.5 Naměřené hodnoty	55
3.4.5.1 Průběh průtoku kovu	55
3.4.5.2 Teplota taveniny	55
3.4.5.3 Teplota formy	55
3.4.6 Vyhodnocení.....	55
3.5 Metalografické zkoušky.....	57
3.5.1 Použitá zařízení	57
3.5.2 Průběh přípravy vzorků.....	58
3.5.3 Vyhodnocení.....	59
4 Závěr.....	67

1 Úvod

Taveniny mohou být znečištěny různými mechanickými částicemi buď původu vnějšího (exogenní vměstky) nebo původu vnitřního jako produkty metalurgických reakcí (endogenní vměstky), které narušují strukturní celistvost daného odlitku. Pro jejich odstranění, dosažení maximální kvality taveniny a získání slitiny s co nejlepšími mechanickými vlastnostmi se provádí slévárenské operace jako filtrace [1].

Filtrování taveniny je běžnou praxí ve většině sléváren. S rostoucí produkcí různých druhů filtrů je však zapotřebí více porozumět technologii filtrace, výhodám jednotlivých typů filtrů a naopak nevýhodám různých filtrů pro dané aplikace. Kvalitní filtr by měl mít výborné vlastnosti ve všech směrech, ale právě spojit všechna nej. do jediného filtru nelze. Na trhu je široká škála slévárenských filtrů a vybrat ten pravý pro daný typ odlitku, druh taveniny a způsob lití není jednoduché. Každý druh filtru má své silné a slabé stránky. Na těchto rozdílech by pak mělo být založeno rozhodnutí o použití filtru pro konkrétní případ.

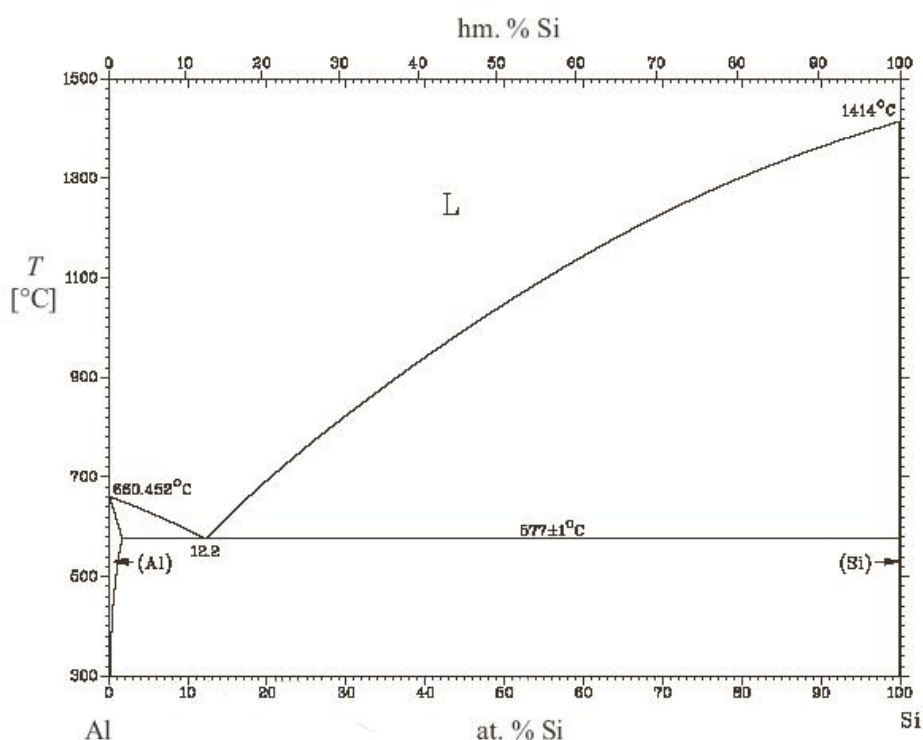
Třebaže už byly v různých studiích uvedeny některé rozdíly v účincích jednotlivých filtrů, zdá se, že slévárny vnímají efekt filtrace různých druhů filtrů za stejný. Pokud filtr zachytí větší vměstky, jako částice formovací směsi nebo strusku, a do určité míry zklidní proud taveniny, což zpravidla není uvažováno, pak tento filtr splnil svůj úkol. Nebývá však uváženo zvýšení fyzikálních vlastností odlitku, snížení nákladů na opracování způsobené zlepšením obrobiteľnosti, zlepšení kvality povrchu odlitků a snížení bublinatosti. Rozhodnutí kupujícího jsou většinou založena spíše na ceně než na uvážení účinku filtrace a z toho vyplývající kvalitě odlitků. Tato domněnka způsobuje pokles prodeje dražších filtrů, při současném zvyšování produkce levnějších druhů filtrů.

Jelikož kupující mnohdy nedokáže určit jaký druh filtru je vhodný pro jeho aplikaci, nebo dokonce nedokáže zhodnotit výhody použití filtru vůbec, měly by být tyto vlastnosti a hodnoty jasně specifikovány výrobcem či prodejcem. Specifická data a výsledky této a dalších prací zabývajících se problémem filtrace a vlivy různých typů filtrů na konečný odlitek, by snad mohly pomoci při výběru vhodného filtru a jeho použití v praxi.

2 Teoretická část

2.1 Siluminy

Slitiny Al-Si jsou hojně používaným druhem slitin ve slévárnách neželezných kovů a tvoří většinu produkce hliníkových odlitků. Na obr. 2.1 je fázový diagram binárního systému hliník - křemík. Eutektická teplota je 577°C a eutektická koncentrace 12,5% Si. Maximální rovnovážná rozpustnost Si v Al je 1,65%, proto u slévárenských slitin, kde je obsah křemíku vždy vyšší, nalezneme eutektikum $\alpha(\text{Al})$ -Si [2].



Obr. 2.1 Fázový diagram Al –Si [2].

2.2 Slitiny Al-Si-Cu

Tyto slitiny jsou mezi hliníkovými slitinami nejrozšířenější a to především v automobilovém průmyslu. Obsah křemíku se pohybuje mezi 6 až 13% a obsah mědi mezi 1 až 5%. Přidáním mědi získáváme výbornou obrobitelnost a dobré mechanické vlastnosti. Dále také určitý stupeň vytvrzení a to zejména při rychlejší ochlazení, kdy vzniká více přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. Samovolné vytvrzování probíhá po dobu několika dnů [3].

2.2.1 Slitina AlSi9Cu3

Označení slitiny EN AB-46500, chemické označení: EN AB-AlSi9Cu3(Fe)(Zn), DIN slitina: 226/3. Tato slitina má velmi dobrou slévatelnost, je obzvláště vhodná pro tlakové lití. Má menší tendenci ke vzniku vnitřních staženin a k formování povrchových defektů. Vyniká dobrou obrobitelností a dosahuje se kvalitního povrchu. Má špatnou odolnost proti korozi. Používá se především pro odlitky v automobilovém průmyslu. Chemické složení slitiny je uvedeno v tab. 2.1 [3].

Tab. 2.1 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 [3].

chemické složení %											obsah nečistot %	
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	jeden prvek	celkem
8,0-11,0	1,3	2,0-4,0	0,55	0,05-0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,25	0,05	0,25

2.2.1.1 Mechanické vlastnosti

Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 [3].

metoda lití	P/K	T
Rp 0,2 (Mpa)	90-100	140
Rm (Mpa)	150-170	240
A5 (%)	1	1
Tvrdość HB	60-75	80

Metoda lití: P - do písku, K – gravitačně do kov. Forem, T – tlakově

2.2.1.2 Fyzikální vlastnosti

Měrná hmotnost:	2,75 kg.dm ³
Součinitel tepelné roztažnosti (20-200°C):	22.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Součinitel tepelné vodivosti:	100-110 W/m.K
Elektrická vodivost:	13-17 MS/m

2.2.1.3 Licí vlastnosti

Interval tuhnutí:	600-490°C
Licí teplota:	650–700°C
Tekutost:	dobrá
Odolnost proti trhlinám za tepla:	dobrá
Smrštitelnost:	0,5–08% [4]

2.2.1.4 Použití

Slitina pro všeobecné použití, rovněž pro tvarově složitě odlitky. Zejména pak složitě strojní součásti, odlitky pro automobilní průmysl, klikové skříně, součástky pro elektrotechniku, ložiskové skříně a víka, kryty atd. [3].

2.3 Vměstky ve slitinách hliníku

Nekovové vměstky jsou částice, které se vyskytují v objemu ztuhlého kovu. Narušují souvislost kovové matrice a svou přítomností snižují mechanické vlastnosti slitiny, zhoršují slévárenské vlastnosti, chemickou odolnost, těsnost, obrobiteľnosť, možnosť povrchové úpravy a ďalšie vlastnosti [3].

Vměstek je tedy cizí částice, která narušuje celistvost mřížky kovu a tím zhoršuje mechanické vlastnosti odlitku. Zejména tažnost a únavovou pevnost. Vedle četnosti vměstků má na mechanické vlastnosti vliv především tvar a ostrost. U slitin hliníku jsou velmi nepříznivé oxidické blány. Oxidy hliníku jsou také velmi tvrdé a tím zhoršují obrobiteľnosť. To má za následek zhoršení kvality povrchu odlitku, snížení řezného výkonu a výrazné snížení životnosti řezných nástrojů. S přítomností oxidických blan souvisí také netěsnost odlitků, kdy tlakové médium proniká stěnou odlitku podél vměstků. Další spíše nepřímá vada odlitků bývá bublinatost. I ta souvisí s přítomností vměstků, které slouží jako zárodky pro nukleaci bublin.

2.3.1 Původ vměstků

Vměstky se do taveniny dostávají v celém procesu tavení a během odlévání tekutého kovu. Podle způsobu vzniku se obvykle dělí na vměstky exogenní – tj. takové, které se do kovu dostávají z vnějšku, např. erozí vyzdívky pece nebo pánve z formovacího materiálu nebo jako částice primární strusky, vzniklé oxidací vzdušným kyslíkem a na vměstky endogenní – vnitřní, které v kovu vznikají v důsledku metalurgických reakcí během lití nebo tuhnutí [5]. Vměstky mohou být při lití v různě tekutém stavu, od tekutých přes polotekuté až po tuhé.

2.3.2 Zdroje vměstků

Struska – vzniká ze struskotvorných přísad a vlivem chemických reakcí tekutého kovu během tavení i v lící pánvi. Tato primární struska by měla být před litím co nejdokonaleji odstraněna, případně zachycena již v lícím zařízení. Drobnější částice se často dostávají s kovem do formy a to zejména na počátku lití.

Žáruvzdorný materiál – vměstky vznikají v důsledku eroze žáruvzdorné vyzdívky tavicích pecí, pánví, výlevků nebo pomocného žáruvzdorného materiálu. Složení těchto vměstků odpovídá složení příslušných žáruvzdorných hmot.

Formovací materiál – se do kovu dostává erozí forem a jader působením dynamického a tepelného účinku proudu kovu ve vtokové soustavě nebo v dutině formy. Na vzniku těchto vměstků se významně podílí nevhodný způsob provedení a zaústění vtokové soustavy a rovněž volba nevhodných druhů formovacích hmot. K erozi dochází zejména v místech s velkou turbulencí, v místech prudkých změn směru proudění, v místech, na která dopadá kov z velké výšky nebo na která naráží proud kovu. Dalším, velmi častým zdrojem vměstků tohoto typu, je formovací materiál, který ve formě zůstal jako důsledek nedbalého vyčištění vtokové soustavy nebo dutiny formy před skládáním.

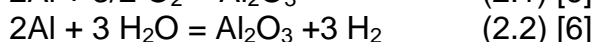
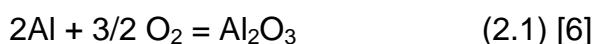
Nátěry – mohou být zdrojem vměstků v případě, že dochází k jejich erozi při lití, nebo v důsledku praskání případně odlupování nátěrů.

Endogenní vměstky – vznikají v důsledku oxidace tekutého kovu během lití nebo jako produkt metalurgických reakcí. Takovými vměstky jsou zejména oxidy, nebo siřičky. Chemické složení a tvar endogenních vměstků jsou rovněž závislé na druhu a koncentraci modifikačních a očkovacích prostředků, desoxidovadel a rovněž na lící teplotě.

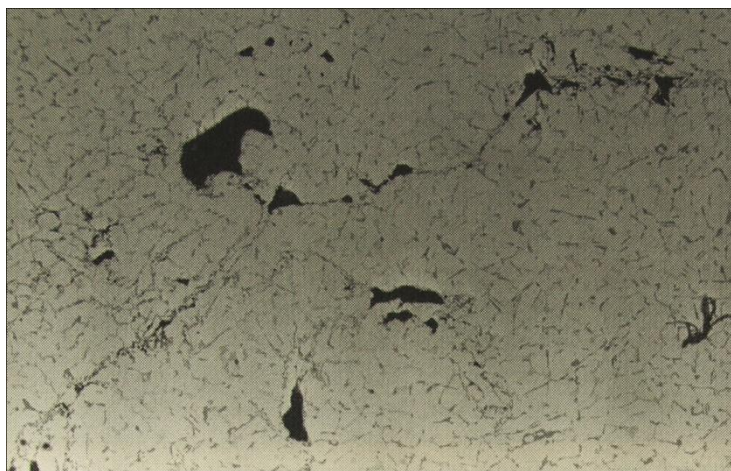
Kovové vměstky – jsou méně častou skupinou vměstků. Jsou to obvykle nerozpuštěné kovové přísady. Nejčastěji špatně rozpuštěná očkovadla nebo legury, přidávané do proudu kovu. K nedokonalému rozpuštění dochází často v případech, kdy se kovová přísada obalí vrstvou strusky. Původ kovových vměstků bývá obvykle snadno identifikovatelný [5].

2.3.3 Typy vměstků ve slitinách hliníku

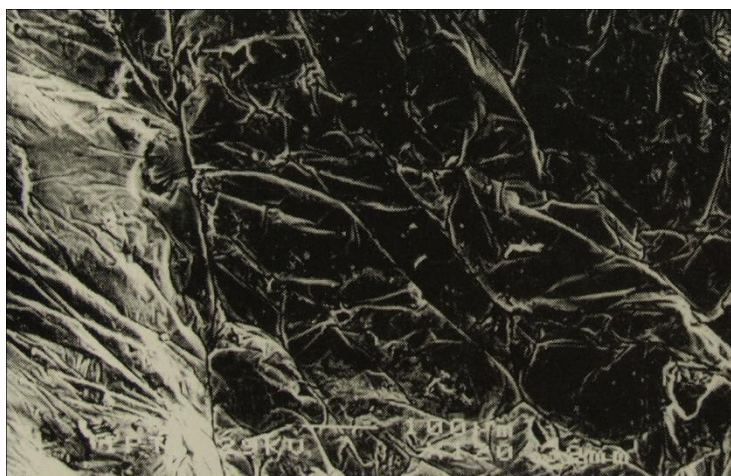
Hliník má velmi vysokou afinitu ke kyslíku, a proto na povrchu taveniny velmi rychle vzniká tenký zoxidovaný povlak a malé částice oxidů. Tvoří se během tavení a odlévání. To je způsobeno reakcí mezi vsázkou a atmosférou resp. vsázkou a vyzdívkou. Jsou to nejčastější typy vměstků a vznikají podle rovnice (2.1). Jak stoupá teplota kovu, stoupá i okysličování hliníku. Zpomalí se až po vytvoření vrstvy Al_2O_3 na povrchu taveniny, která brání prostupu plynu k tavenině. Reakce hliníku s vodní párou probíhá podle rovnice (2.2). Al_2O_3 filmy buď vyplouvají na hladinu taveniny, nebo se v ní drží díky turbulenci. Oxidické vměstky mají tendenci se shlukovat, protože jsou špatně smáčeny tekutým kovem [6].



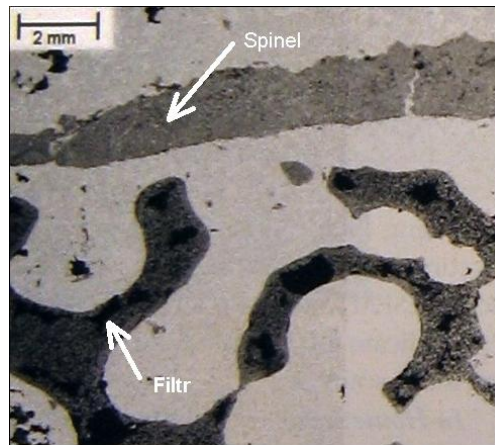
Pokud slitina obsahuje současně hořčík v množství již řádově desetin procent, vzniká oxidací spinel – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO}$ [3]. Spinelové vměstky vznikají při tavení šrotu a při přidávání hořčíku do udržovací pece. A to od chvíle, kdy má MgO nižší volnou entalpii slučování než Al_2O_3 . Je tedy větší sklon k tvorbě spinelových vměstků, jejichž tvorba je energeticky méně náročná. To zvláště pokud je hmotnostní obsah Mg větší než 0,5% [6]. Na hladině taveniny hliníku, oxidy Al_2O_3 a MgAl_2O_4 vytvoří pevný film během několika milisekund. Hlavním produktem reakce je smíšený amorfni oxidický povlak, jak je ukázán na obr. 2.2 a 2.3 [7]. Spinely MgAl_2O_4 jsou rozměrné vměstky (někdy o velikosti 500 mikronů v průměru), jak je vidět na obr. 2.4 [8].



Obr. 2.2 Mikrostruktura s viditelným amorfni oxidickým filmem, zvětšeno 40x (zmenšeno pro publikaci) [7].

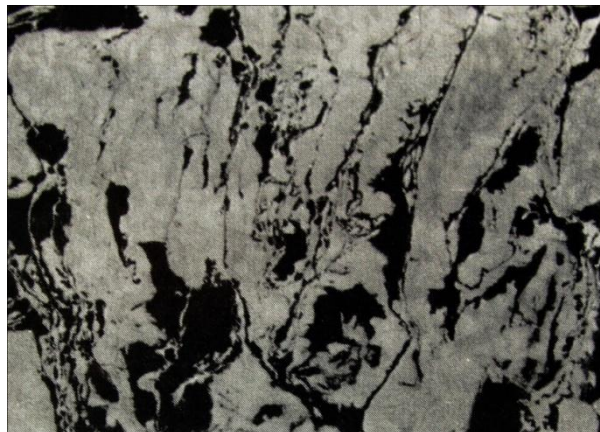


Obr. 2.3 Vzhled amorfni oxidického filmu pozorovaného pod elektronovým mikroskopem, zvětšeno 120x (zmenšeno pro publikaci) [7].

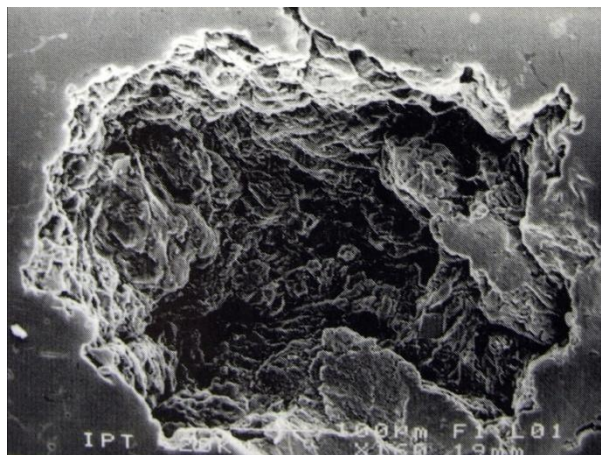


Obr. 2.4 Rozměrný spinel zachycený u vstupu do pěnového keramického filtru [8].

Po 5 až 10 min. na teplotě 750°C se mění amorfni oxid na spinel $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, krystalickou fází s hustotou 3,42 až 3,96 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a s měrným povrchem kolem 400 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, obr. 2.5 a 2.6. Znečištění krystalickými vměstkami $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ a MgO stejně jako udržování taveniny na vysoké teplotě tuto inkubační dobu snižují [7].

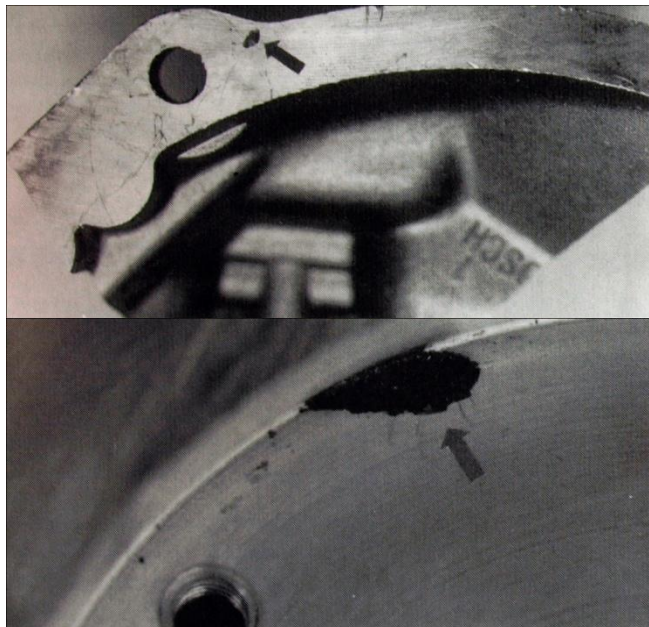


Obr. 2.5 Mikrostruktura s viditelným $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ filmem, zvětšeno 100x (zmenšeno pro publikaci) [7].

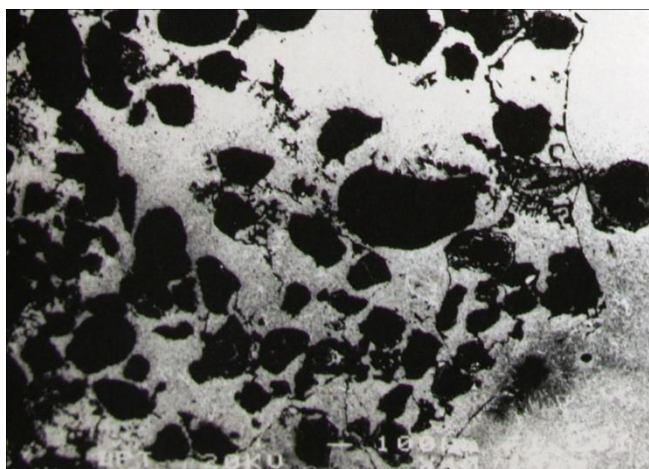


Obr. 2.6 Vzhled $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ filmu pozorovaného pod elektronovým mikroskopem, zvětšeno 160x (zmenšeno pro publikaci) [7].

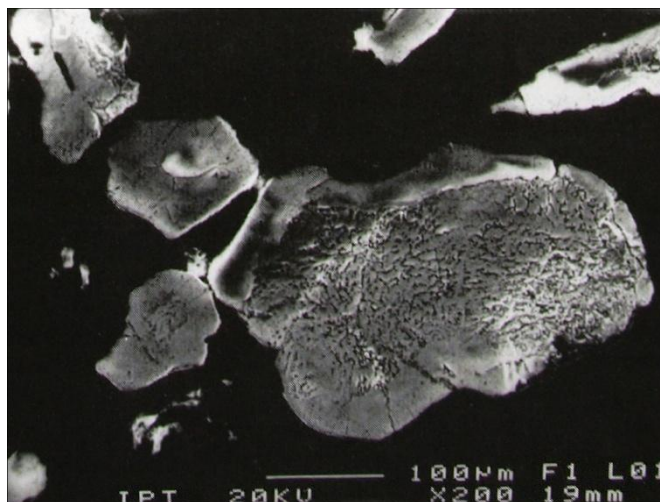
Spinel je teplotně nestabilní a při teplotách nad 700°C (ale zvláště nad 770°C) se postupně transformuje na termicky stabilní korund $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ s hustotou 3,95 až 4,1 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a měrným povrchem pouze asi 10 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, jak je vidět na obr. 2.8 a 2.9. Korund je velmi tvrdý a je hlavní příčinou zhoršení obrobitelnosti slitiny. Na obr. 2.7 je součást s viditelným korundem. Zatímco spinel s menší hustotou a měrným objemem zůstává rozptýlen v objemu taveniny, korund sedimentuje. Při přeměně spinelu na korund se zmenšuje měrný objem a v oxidické vrstvě vznikají trhliny, které umožňují další přístup kyslíku a pokračující oxidaci. Teplota přehřátí kovu by proto neměla překročit teplotu této transformace [3].



Obr. 2.7 Součást odlitá vysokotlakým litím s viditelným korundem $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [7].



Obr. 2.8 Vzhled $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ vmětku, zvětšeno 40x (zmenšeno pro publikaci) [7].



Obr. 2.9 Vzhled $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ vměstku pozorovaného pod elektronovým mikroskopem zvětšeno 200x (zmenšeno pro publikaci) [7].

Vysoká rychlost oxidace taveniny, v kombinaci se slabým ochranným povlakem, vedou ke vzniku nových oxidických filmů během slévárenských operací, při nichž dochází k pohybu taveniny. Jako je indukční tavení, odplyňování, doprava kovu a lití. Proto je nutné co nejpečlivěji zachovávat celistvost oxidické vrstvy na hladině kovu.

Nitridové vměstky (AlN) vznikají z hořčíkových nitridů (Mg_3N_2). Bylo vypořádáno, že částice MgF_2 a MgS vznikají, pokud je do taveniny přidáván „špinavý“ hořčík. Křemenné částice se většinou dostávají do taveniny erozí keramických materiálů užívaných jako příslušenství při tavících operacích. Tyto tvrdé částice se shlukují a slučují jako například $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{CaO}$. Další komplikované látky, vměstky v kapalném skupenství, vznikají v hliníkové tavenině jako výsledek rafinace a odplyňování chlórem, tzn. chloridy a chloridové soli (CaCl_2 , NaCl , MgCl_2 a KCl). Tyto soli mohou také obsahovat jemné krystaly NaF , AlF_3 a CaF_2 . Tyto tekuté vměstky narušují mezifázovou energii systému. Například u boridů, které jsou používány jako očkovadlo, dochází k jejich shlukování, pokud jsou pokryty tekutou solí [6]. Zvláštní pozici mezi prvky má berylium, které má vysokou afinitu ke kyslíku, ale již při obsahu několika ppm Be se tvoří nepropustná vrstva spinelu $\text{BeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, která velmi účinně brání další oxidaci [3]. Základní typy vměstků, které se vyskytují v hliníkových slitinách, jsou uvedeny v tab. 2.3.

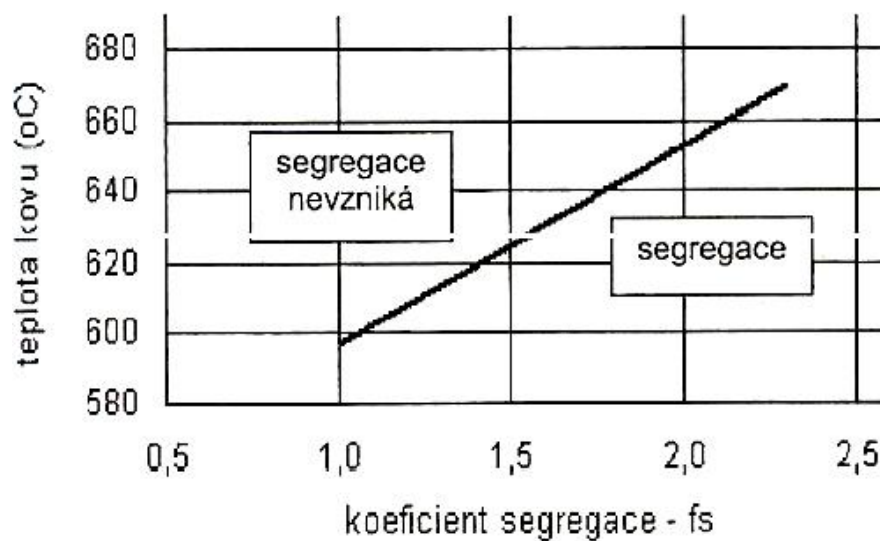
Tab.2.3 Klasifikace základních druhů vměstků v hliníkových slitinách [6].

Typ	Tvar	Hustota ρ (g/cm ³)	Rozměr (μm)	teplota tavení (°C)
oxidy				
MgAl ₂ O ₃ (spinel)	částice, povlak, vločky	3,6	0,1 až 100, 10 až 5000	2825
Al ₂ O ₃	částice, povlak	3,97	0,2 až 30, 10 až 5000	2047
MgO	částice, povlak	3,58	0,1 až 5, 10 až 5000	2115
SiO ₂	částice	2,66	0,5 až 30	1650
CaO	částice	3,37	< 5	2630
karbidy				
Al ₄ C ₃	částice, shluky	2,36	0,5 až 25	2100
SiC	částice	3,22	0,5 až 5	2540
boridy				
TiB ₂	částice, shluky	4,5	1 až 30	2790
AlB ₂	částice	3,19	0,1 až 3	2160
nitridy				
AlN	částice, povlak	3,26	10 až 50	2227
ostatní				
Chloridy a soli (CaCl ₂ , NaCl, MgCl ₂)	tekuté kapičky	1,9 - 2,2	0,5 až 1	712 až 800
Fluoridy (cryolite)		2,9 - 3,0		1000
Usazeniny, kal Al(FeMnCr) Si		> 4,0		
plynové bubliny				
Argon				
N ₂			10 až 30	
intermetalické fáze				
(TiAl ₃ , TiAl, NiAl, Ni ₃ Al)	částice, shluky		10 až 100	

Dalším typem vměstků vyskytujícím se v hliníkových slitinách jsou intermetalické fáze. Většina intermetalických fází, s nimiž se setkáme ve slitinách hliníku, se z taveniny vylučuje až v intervalu krystalizace. V roztaveném kovu se tedy nevyskytují. Výjimkou je fáze, která se označuje jako „kal“ nebo „písek“ (angl. se označuje jako „sludge“). Tato fáze vzniká ve slitinách s vyšším obsahem železa, manganu a chrómu při nízkých teplotách. Nebezpečí vzniku kalu vzrůstá s rostoucím koeficientem segregace f_s daným rovnicí (2.3).

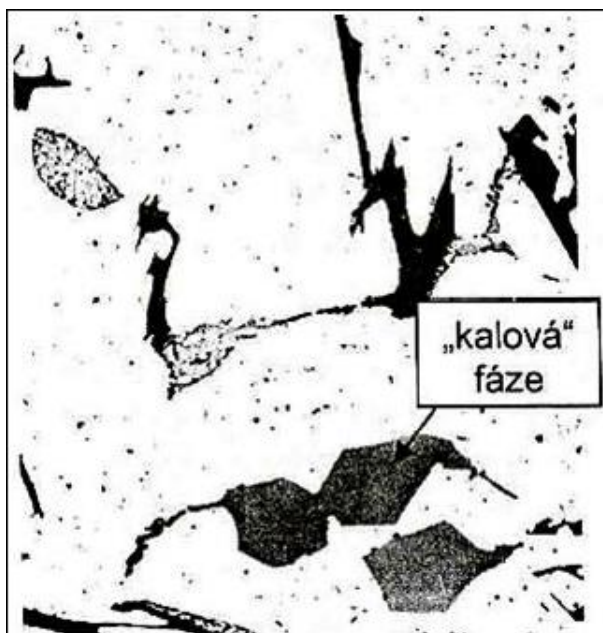
$$f_s = \%Fe + 2.\%Mn + 3.\%Cr \quad (2.3) [3]$$

Při hodnotách $f_s < 1$ se obvykle kalové fáze netvoří. „Kalová“ fáze vzniká postupně při dlouhodobém udržování tekutého kovu při teplotách, které jsou nižší, než je uvedeno na obr. 2.10. Dále při vsázení studeného materiálu do roztaveného kovu nebo při přelévání taveniny do studené pánve a v dávkovacím nebo licím zařízení, když došlo k celkovému nebo místnímu ochlazení kovu.



Obr. 2.10 Teplota vzniku „kalu“ [3].

Škodlivost kalových fází v odlitcích souvisí především s jejich vysokou tvrdostí 800 až 1000 HV. Zvyšují opotřebení kovových forem, licí komory a pístu licího stroje při lití pod tlakem. Zhoršují zabíhavost a mohou ucpávat naříznutí vtoku v kovových formách. U odlitků zhoršují obrobitelnost a významně zvětšují opotřebení rezných nástrojů. Odstranění těchto částic z taveniny je možné filtrací při přelévání z tavicí pece nebo při odlévání. „Kalovou“ fázi v siluminu ukazuje obr. 2.11 [3].



Obr. 2.11 „Kalová“ fáze v siluminu [3].

2.4 Rafinace taveniny

Jako proces rafinace je označováno snižování množství vměstků v tavenině. Existují čtyři základní způsoby čištění hliníkové taveniny: odstátí taveniny, profukování taveniny plyny (flotace), chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí a filtrace. Pouze flotace, krycí a rafinační přípravky a filtrace se používají v běžné slévárenské praxi [3], [7].

2.4.1 Vynášení vměstků plynovými bublinami

Odplyňování na rotorovém odplyňovacím zařízení bylo původně vyvinuto, aby mohl být účinně snížen obsah H_2 v tavenině. Ačkoliv je hlavním cílem vodíkové odplyňování, proud bublin inertního plynu odnáší vměstky na hladinu taveniny, odkud mohou být stírány [7].

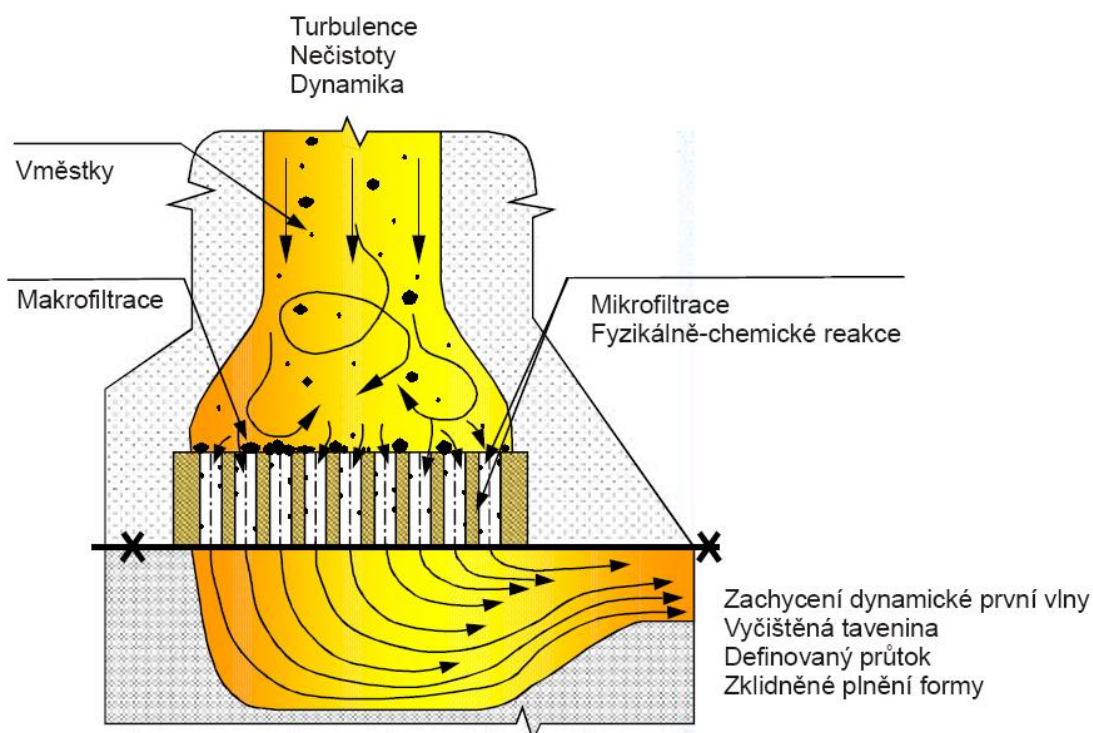
2.4.2 Krycí a rafinační přípravky

Krycí soli jsou směsí především chloridů a fluoridů alkalických kovů. Jejich účelem je bránit přímému kontaktu taveniny s atmosférickým kyslíkem a s vlhkostí. Složení přípravku se volí tak, aby jejich teplota tavení byla nižší, než je tavící teplota slitiny, tj. na tavenině tvoří tekutou ochrannou vrstvu strusky.

Účelem rafinačních solí je odstranit z taveniny oxidické vměstky, snížit ztráty hliníku, případně snížit obsah některých nežádoucích prvků. Chemicky se opět jedná o směs chloridových a fluoridových solí s přísadou dalších aktivních komponent, které s nimi reagují a ovlivňují povrchové napětí mezi kovem a oxidy. Některé složky rafinačních solí umožňují selektivní odstranění nežádoucích prvků. Rafinační přípravky se používají obvykle až v závěru tavby. Pomocí ponorného zvonu se potopí ke dnu lázně. Soli je nutno v lázni dokonale promíchat v celém objemu taveniny. Velmi účinná je injektáž rafinačních solí do taveniny dmýcháním neutrálního plynu. Po aplikaci rafinační soli je nutno nechat taveninu „odstát“, tj. zařadit prodlevu nejméně 5 až 10 min. během níž reakční zplodiny vyplavou na hladinu [3].

2.4.3 Filtrace

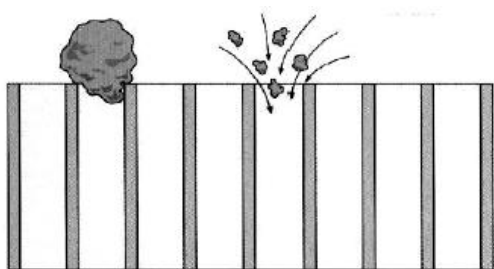
Filtrací se rozumí separace vměstků, v té době přítomných v kovu. K tomu se používají ploché tkaninové filtry, kovová sítky nebo keramické filtry. Filtr je možno použít např. při přelévání kovu z tavicí pece do pece udržovací, umístit jej jako přepážku mezi zásobníkem tekutého kovu a odběrnou částí pece, nejčastěji se však zařazuje do vtokové soustavy každé formy, obr. 2.12 [5]. Filtraci lze zjednodušeně rozdělit na tři základní mechanismy: filtrace cezením, tvorba filtračního koláče a hloubková filtrace.



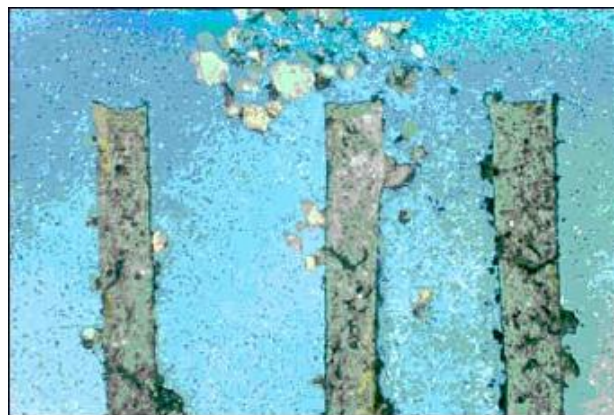
Obr. 2.12 Schematické znázornění činnosti filtru [9].

2.4.3.1 Filtrace cezením

Na přední straně jsou zachytávány částice strusky a vměstky, které jsou větší než otvory resp. póry ve filtru. Částice tedy neprojdou filtrem do dutiny formy kvůli své velikosti. U slitin hliníku se takto zachytávají především oxidické blány. Na obr.2.13a je znázorněn mechanismus filtrace cezením a na obr.2.13b je vidět shluk exogenních vměstek zachycených na čelní straně filtru.



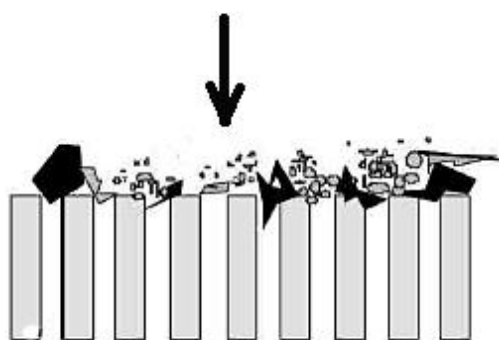
Obr. 2.13a Mechanismus cezení [5].



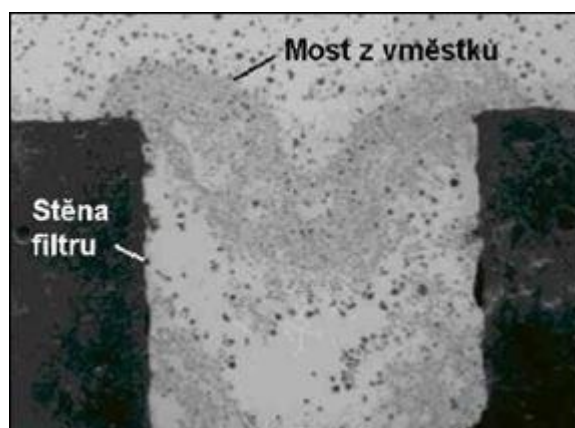
Obr. 2.13b Zachycený shluk zrn formovací směsi [10].

2.4.3.2 Tvorba filtračního koláče

Velké částice, které se nahromadily v průběhu cezení na čelní straně filtru, vytvoří útvar, který nazýváme „filtrační koláč“, obr.2.14a (šipka v obrázku znázorňuje směr tečení kovu). Na něm se následně zachycují menší vměstky, které by při filtraci cezením filtrem protekly. Tato filtrační vrstva se postupně zvětšuje, až dojde k ucpání filtru. Filtrací mechanismem filtračního koláče se zachycují i velmi drobné vměstky s rozměry až 1-5 μm , obr.2.14b [5].



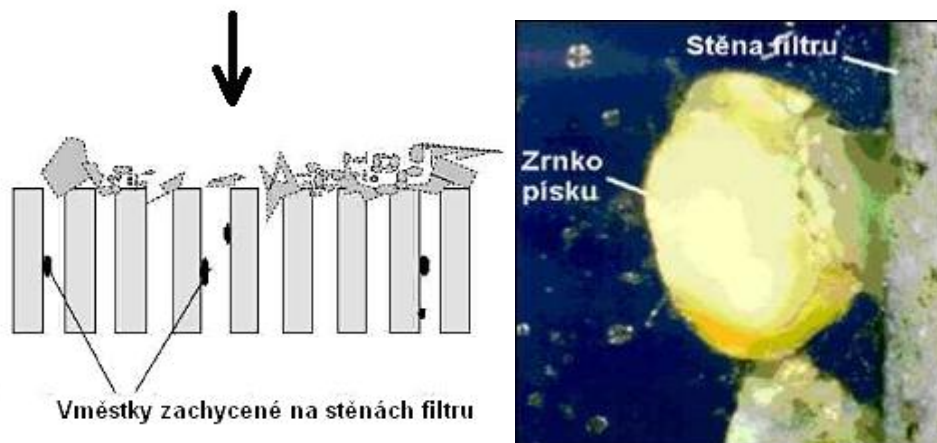
Obr. 2.14a Tvorba filtračního koláče [10].



Obr. 2.14b Můstek z vměstků přes otvor ve filtru [10].

2.4.3.3 Hloubková filtrace

Mechanismus hloubkové filtrace probíhá v celém objemu filtru. Její princip spočívá v adhesi (nalepování) vměstků na stěnách keramiky filtru a ve spojování jednotlivých vměstků navzájem. Na účinnost hloubkové filtrace má vliv teplota kovu, chemické složení materiálu filtru a vměstků (vzájemná smáčivost) a rovněž tvar kanálů filtru. Na obr. 2.15a je znázorněn mechanismus hloubkové filtrace a na obr. 2.15b je vidět tuhý vměstek zachycený na stěně lisovaného filtru [5].



Obr. 2.15a Hloubková filtrace [10]. Obr. 2.15b Zrnko písku zachycené na filtru [10].

Pravděpodobnost zachycení vměstku hloubkovou filtrací se zvyšuje, čím menší je průřez kanálů a čím více kov víří a mění směr. Adhesní síly přidržují jednotlivé vměstky navzájem a zejména je fixují na stěnách kanálů filtru. Má-li být vměstek ve filtru zachycen hloubkovou filtrací, je nutné, aby adhesní síly byly větší, než dynamický účinek kovu, který se naopak snaží vměstky strhnout do proudu. Je zřejmé, že šance na zachycení vměstků bude tím větší, čím větší jsou adhesní síly a čím menší je rychlost proudění kovu. Ideálními místy pro zachycení vměstků jsou taková místa ve filtru, kde je rychlost proudění velmi malá.

K adhesi 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 (2.4) menší než 0 ($\Delta G < 0$), pak bude inkluze pevně fixována k povrchu filtru.

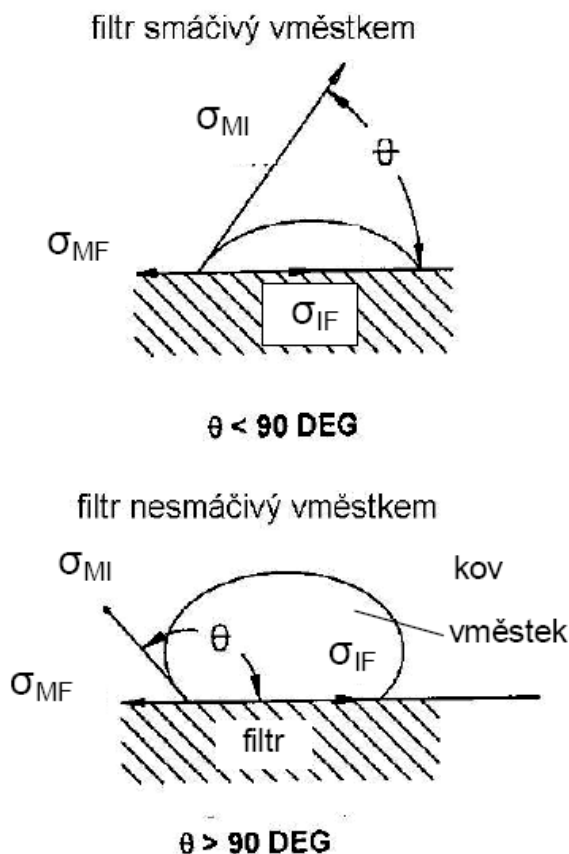
$$\Delta G = \sigma_{IF} - \sigma_{MF} - \sigma_{MI} \quad (2.4) [5]$$

Kde σ - je mezifázová energie.

Poměr mezifázových napětí mezi kovem, vměstkem a filtrem se projevuje vzájemnou smáčivostí nebo nesmáčivostí jednotlivých složek. Smáčivost se charakterizuje velikostí úhlu smáčení θ a projeví se tvarem menisku tekuté fáze, obr. 2.16. Jestliže filtr je tekutým vměstkem smáčivý, je úhel $\theta < 90^\circ$. Nesmáčivý vměstek má $\theta > 90^\circ$. Velikost adhesní síly je dána vztahem (2.5).

$$(WA)_{IF} = \sigma_{MI} (1 + \cos \theta_{FI-MI}) \quad (2.5) [5]$$

Z toho vztahu je zřejmé, že čím lepší je smáčivost filtru tekutým vměstkem, tím větší jsou fixační síly. Tímto mechanismem mohou být zachyceny i tuhé vměstky. V případě, kdy jak materiál filtru, tak tuhá inkluze (vměstek) jsou taveninou nesmáčivé, je vměstek kapilárními silami vytlačen ke stěně filtru, kde je těmito silami přidržován. Různé materiály a různé vměstky mají různou smáčivost tekutým kovem a tedy i různou schopnost zachycovat tuhé vměstky.



Obr. 2.16 Smáčení filtru tekutým vměstkem [5].

2.5 Filtry

U jakostních odlitků je použití filtrů dnes už standardem a stává se běžnou praxí pro stále zvětšující se počet sléváren. S narůstajícím počtem filtrů ve výrobě je třeba blíže porozumět celkové technologii filtrace a činnosti filtrů vůbec. Předpokládaný vývoj produkce filtrů v Evropě je uveden v tab. 2.4. Filtr by měl mít co nejlepší parametry při co nejnižší ceně. Všechny dobré vlastnosti však pokrýt nelze, protože jdou často proti sobě. Například pokud má filtr zvlášť velkou kapacitu, pak může být účinnost jeho filtrace menší. Nejúčinnější slévárenské filtry jsou konstruovány tak, aby podávaly optimální výkon ve všech důležitých parametrech.

Tab. 2.4 Vývoj prodeje filtrů v Evropě [9].

	Rok 1995	Rok 2000	Rok 2005	Rok 2010
Celkem prodej (mil. kusů)	100	200	250	300
<i>z toho</i> pěnové	70	140	160	180
lisované	10	40	70	100
extrudované	20	20	20	20

2.5.1 Požadavky kladené na filtry

Filtrační kapacita

Je dána množstvím kovu, který proteče filtrem, než dojde k ucpání nebo významnému snížení průtoku kovu přes filtr. Filtrační kapacita se udává v kg/cm². Požadované množství taveniny, která by měla protéct přes filtr, je dána hmotností odlitku. Kapacita by se neměla filtr od filtru lišit a mělo by být vyloučeno riziko zanesení filtru. To bývalo způsobeno nehomogenitou keramiky filtru. Dnes jsou nevyhovující filtry (zmetky) vyřazeny na základě měření jejich hmotnosti.

Průtočnost

Průtočnost je spojena s odporem filtru a udává se v kg/s. Odpor filtru a tedy i jeho průtočnost je závislá na provozních podmínkách (na licí výšce, vtokové soustavě, teplotě taveniny, druhu slitiny atd.). V praxi se tedy případ od případu mění a nelze ji zobecnit.

Pevnost (za tepla a za studena)

Pevnost za studena je důležitá pro účely dopravy a manipulace. Je důležité, aby se části neodlamovaly nebo neuvolňovaly, protože mohou být později odplaveny do dutiny formy [10]. Pevnost za tepla je důležitá při styku filtru s roztaveným kovem. Při kontaktu dochází prudké změně teploty a v důsledku této změny vznikají ve filtru velká pnutí, kterým musí materiál filtru odolat. Také musí filtr odolat prvotnímu nárazu kovu.

Nízká tepelná kapacita

Filtr ve vtokové soustavě představuje nejen hydraulický, ale také tepelný odpor. Množství tepla, které filtr kovu odebere, můžeme vyjádřit rovnicí (2.6).

$$Q_f = m_f \cdot c_f (t_k - t_0) \text{ [J]} \quad (2.6) \text{ [11]}$$

Kde m_f – je hmotnost keramického filtru (kg)
 c_f – je měrná tepelná kapacita filtru (J/kg.K)
 t_k – teplota kova (°C)
 t_0 – počáteční teplota filtru (°C)

Pokud by filtr odebral kovu příliš tepla, mohlo by dojít k různým vadám způsobených „studeným“ kovem, nebo i k „zamrznutí“ kovu ve filtru [11].

Zklidnění toku taveniny

Omezení turbulentního proudění je po odstraňování vměstků druhým nejdůležitějším parametrem. Je tím především omezena další dezoxidace kovu a taky sníženo erozivní chování taveniny.

Dobrá filtrační účinnost

Obecně můžeme účinnost filtrace vyjádřit vztahem (2.7).

$$\eta = \frac{C_{vstup} - C_{výstup}}{C_{vstup}} \cdot 100 [\%] \quad (2.7) [11]$$

Kde C_{vstup} – je koncentrace vměstků na vstupu
 $C_{výstup}$ – je koncentrace vměstků na výstupu
 η – je účinnost filtrace (%)

Hodnotit množství vměstků v kovu je prakticky velmi složité a tedy i určení účinnosti filtrace není příliš přesné [11].

Nákladnost

Při splnění všech požadavků kladených na filtr by měl být filtr ještě navíc cenově přijatelný, aby přinášel slévárně ekonomické výhody.

2.5.2 Druhy filtrů

2.5.2.1 Ploché filtry

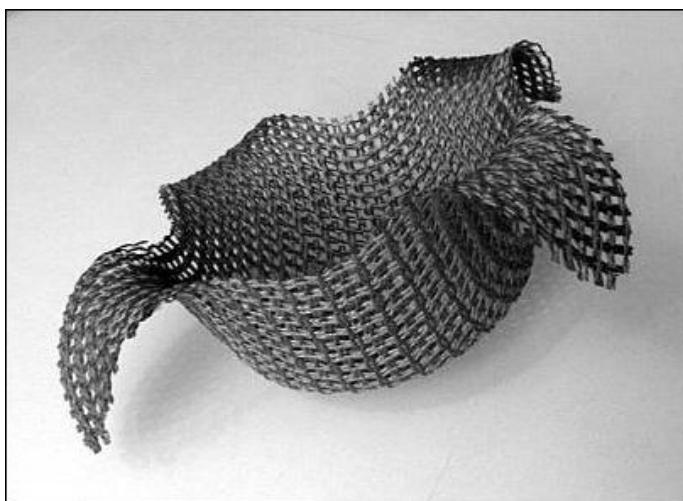
Ploché filtry mají podstatně větší rozměry v ploše nežli v tloušťce. Jsou tedy schopny zachytit mechanismem cezení vměstky větší, než je velikost otvorů ve filtru. Po vytvoření filtračního koláče zachycují i vměstky daleko menší velikosti, až řádově v jednotkách mikrometrů. Mechanismus hloubkové filtrace se u těchto filtrů neuplatňuje, nebo jen částečně. Nejčastěji se plošné filtry používají pro slitiny, kde se vyskytují vměstky typu blan. Jsou tedy vhodné pro slitiny hliníku.

Kovová síťka

Používají se pouze pro slitiny s nižší licí teplotou, aby nedošlo k jejich natavení. Síťky z ocelového drátu s velikostí ok kolem 2-3 mm se vystřihnou na velikost větší, než je průtočný profil v místě založení mřížky. Mřížky jsou obvykle umístěny do rozšířeného profilu ve struskováku – jakési komůrky. Po ztuhnutí však ocelový filtr zůstává zatuhnutý ve vtokové soustavě, s níž se dostává jako vratný materiál zpět do tavicí pece. To může vést k nežádoucímu zvýšení obsahu železa v tavenině [5].

Tkaninové filtry

Jsou utkány z žáruvzdorných vláken do pramenů a ty následně tvoří mřížku filtru. Jsou vyráběny filtry s různou tloušťkou pramenů, velikostí ok a s různým profilem. Pro hliníkové slitiny se používají filtry s velikostí ok v rozmezí 1,0 až 2,0 mm. Žáruvzdorná tkanina je vyrobena z vláken amorfního SiO₂ s čistotou 97-99 %. Utkaný filtr se tepelně a chemicky dále zpracovává, což dále zvětšuje podíl SiO₂, zvyšuje tuhost filtru a zlepšuje vlastnosti za vysokých teplot. Tkaninový filtr ve tvaru košíčku je ukázán na obr. 2.17 [5].



Obr. 2.17 Tkaninový filtr do vtokové jamky [5].

Profilované filtry pro hliníkové odlitky

Jsou vyrobeny ze zvlněné sítky ze skelného vlákna, pokrytého vrstvou speciálního anorganického polymeru. Sestávají z kompaktního bloku jednoho, dvou, či tří vlnitých laminátových destiček, vzájemně pootočených o 90°. Je možno zvolit hrubší či jemnější velikost otvorů v síťce. Obr. 2.18 ukazuje profilovaný filtr Gephal® [12].



Obr. 2.18 Profilovaný filtr pro hliníkové odlitky Gephal® [12].

2.5.2.2 Objemové filtry

U objemových filtrů se kromě mechanismu cezení a tvorby filtračního koláče využívá i hloubková filtrace. Schopnost hloubkové filtrace se u jednotlivých typů filtrů liší. Tyto filtry jsou charakteristické větší tloušťkou (11 až 50mm). Základní typy jsou: lisované, extrudované, pěnové.

Lisované

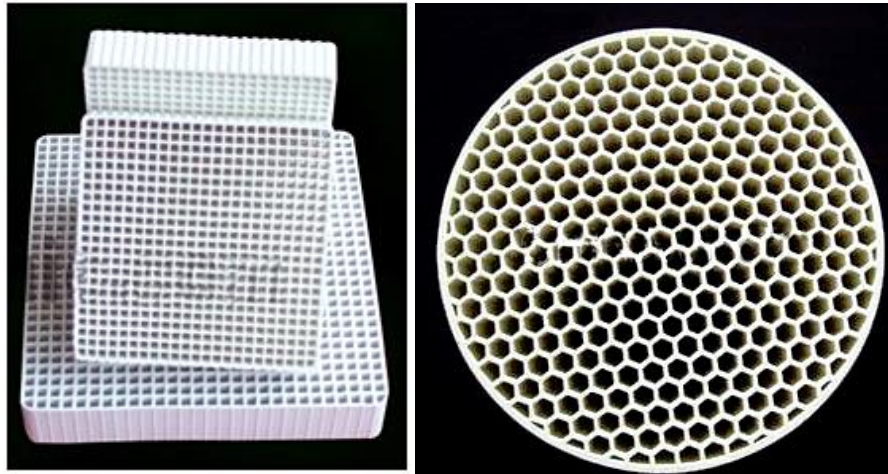
Tento typ filtrů je vyráběn lisováním polosuché keramické hmoty v kovových formách. Vznikají tak filtry kruhového nebo čtvercového průřezu s přímými kruhovými otvory. Následně jsou žíhány. Charakterizovány jsou rozměrem, velikostí otvorů (1,8 až 2,5mm) a materiálem. Hloubková filtrace se u nich uplatňuje v daleko menší míře než u ostatních typů, fungují tedy podobně jako cedítka. Lisovaný filtr je vyobrazen na obr. 2.19 [11].



Obr. 2.19 Lisovaný filtr [13].

Extrudované

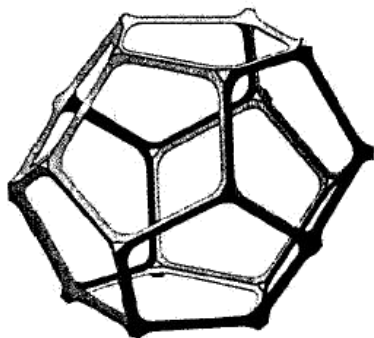
Extrudované filtry se vyrábí protlačováním plastické keramické hmoty na protlačovacím stroji a následně jsou řezány. Vznikají tak filtry s přímými kanály ve tvaru čtverce, obdélníku nebo trojúhelníku. Extrudované filtry s čtvercovými kanály ukazuje obr. 2.20. Na trhu jsou také tzv. „Honeycomb“ filtry, obr. 2.21, tyto mají kanály ve tvaru včelích pláství. Tvar těchto kanálů zajišťuje poměrně účinnou hloubkovou filtraci. Kromě tvaru otvorů jsou charakterizovány materiálem, rozměrem a počtem otvorů na čtvereční palec, tedy hodnotou CSI (cells per square inch). Používají se filtry s hodnotou CSI 50 až 300.



Obr. 2.20 Filtry s čtvercovými otvory [14]. Obr. 2.21 extrudovaný „honeycomb“ filtr [15].

Pěnové

Základem výroby pěnových filtrů je polyuretanová matrice, která je nabobtnána a nařezána na požadovaný tvar a rozměr filtru. Následně je napuštěna keramickou suspenzí. Po vypálení vznikne keramická kostra filtru, která je tvořena soustavou propojených buněk. Obr. 2.22 ukazuje pentaedrickou buňku pěnového filtru. Filtry se liší především velikostí pórů, která je dána pórovitostí použité pěny, dále pak materiálem a rozměry [5]. Pórovitost má jednotky PPI (pores per inch) a pohybuje se v rozmezí 10 až 40 PPI [11]. Na obr. 2.23 jsou různé tvary keramických pěnových filtrů.



Obr. 2.22 Buňka pěnového filtru [5].



Obr. 2.23 Pěnové keramické filtry [16].

2.5.3 Materiály filtrů

Materiál filtru by měl odolávat nepříznivému prostředí taveniny kovu. Filtr je namáhán zejména teplotním šokem a dynamickým rázem při prvním styku s taveninou. Dále na něj působí vysoká teplota po celou dobu lití. Dlouhodobé mechanické namáhání za vysokých teplot způsobuje creep. Hydraulické síly způsobují erozi filtru a struska působí korozně. Druh keramiky používané pro slitiny hliníku a slitiny s nízkou teplotou tavení shrnuje tab. 2.5.

Tab. 2.5 Druhy používané keramiky pro slitiny hliníku [5].

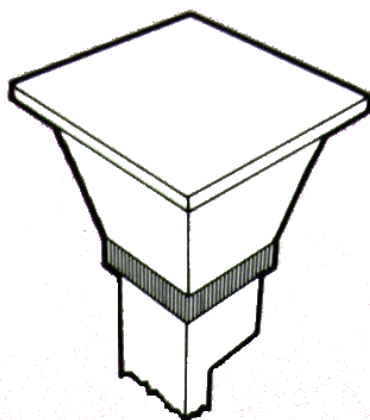
druh filtru	keramika
lisované	Pyrostat (50% SiO ₂ + 40% Al ₂ O ₃)
extrudované	cordielit + mullit
pěnové	hlinitanová - chem. poj. vazba * (Al ₂ O ₃)
	mullit (3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂)

* Záleží na druhu pojiva.

2.5.4 Poloha filtrů ve vtokové soustavě

Přímé lití na filtr

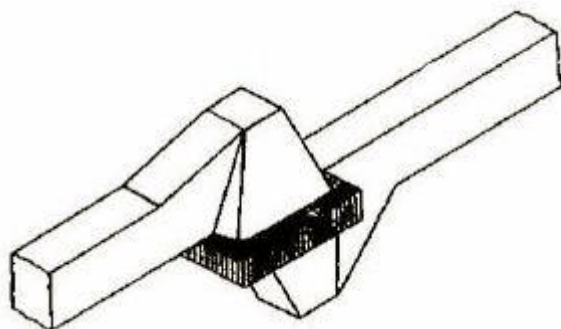
Při tomto způsobu je filtr ve vodorovné poloze, takže na něj přímo dopadá roztavený kov. Filtr může být umístěn v licí nálevce, nebo ve formách se svislou licí rovinou (Disamatic), jak je znázorněno na obr. 2.24. Filtr je při tomto umístění namáhán dynamickým rázem proudu kovu a to zejména při opadu taveniny z velké výšky. Výhodou umístění filtru v licí jamce je, že první struskou znečištěný kov nevrteče přímo do vtokového systému, ale je zachycen v licí jamce a struska má možnost vyplavat na hladinu. Do této kategorie patří také lití na filtr umístěný v exonálitku – Kalpur obr. 2.25.



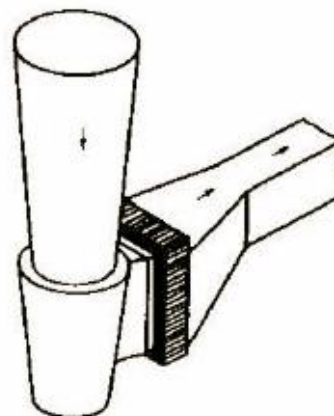
Obr. 2.24 Přímé lití na filtr [17]. Obr. 2.25 Filtr umístěný v exonálitku – Kalpur [18].

Nepřímé lití

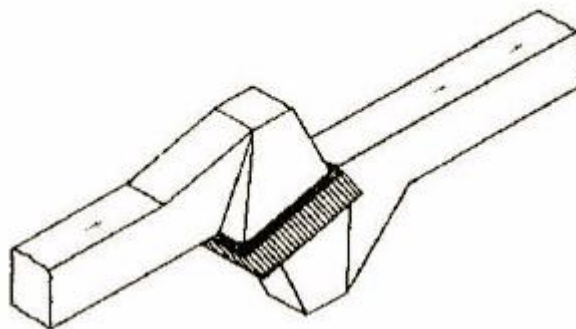
Filtr je umístěn ve filtrační komůrce ve vtokové soustavě. Obecně lze říci, že nejlépe je umístit filtr co nejbližší k dutině odlitku, filtr pak zachytává i vměstky vzniklé erozí formy. Výhodou tohoto způsobu umístění je, že filtr není tolik namáhán proudem kovu. Naopak nevýhodou může být sklon k zamrznutí filtru vlivem ochlazení kovu při průtoku vtokovou soustavou. Poloha filtru může být vodorovná obr. 2.26, svislá obr. 2.27, nebo šikmá obr. 2.28.



Obr. 2.26 Vodorovná poloha filtru [5].

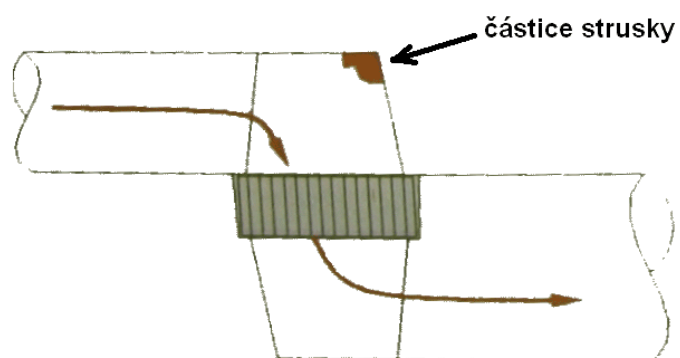


Obr. 2.27 Svislá poloha filtru [5].

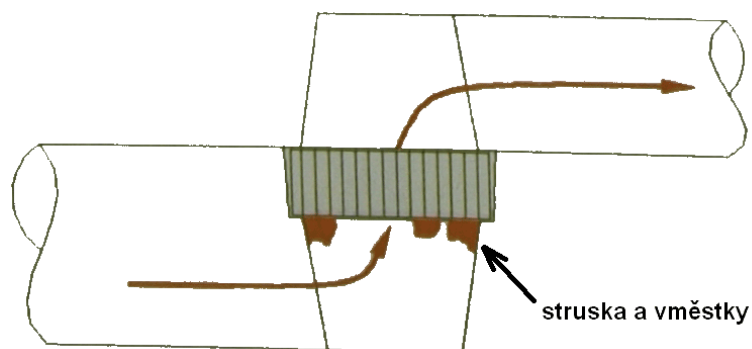


Obr. 2.28 Šikmá poloha filtru [5].

Vzhledem ke směru průtoku taveniny může být filtr orientován dvěma způsoby. Při prvním způsobu jsou velké části strusky zachycovány v rohu struskováku a drží se mimo filtr, jak je vidět na obr. 2.29. V druhém případě se struska a velké vměstky zachycují přímo na čele filtru a tvoří filtrační koláč, obr. 2.30. Takto mohou filtr rychle ucpat. Z tohoto hlediska je zdá se nevhodnější šikmá poloha s orientací proudění taveniny přes filtr podle obr. 2.29. Slévárny však nejčastěji používají horizontální nebo vertikální polohu filtru [19].



Obr. 2.29 Čelo filtru směřuje nahoru [19].



Obr. 2.30 Čelo filtru směřuje dolů [19].

3 Experimentální část

3.1 Cíl experimentu

Cílem této studie bylo zjistit, jaký vliv mají různé druhy filtrů pro hliníkové odlitky na hydraulické odpory ve vtokové soustavě a na rychlost plnění formy. Dále pak zjistit průběh zanášení filtrů vměstky obsaženými v tavenině a prozkoumat schopnost jednotlivých typů filtrů zachycovat různé druhy vměstků. Jako vedlejší studie byl také zkoumán vliv filtrů na naplynění taveniny.

Experimentální část této práce je proto rozdělena na zkoušky prolévací, měření naplynění a metalografické zkoušky.

3.2 Zkoušky průtočnosti filtrů

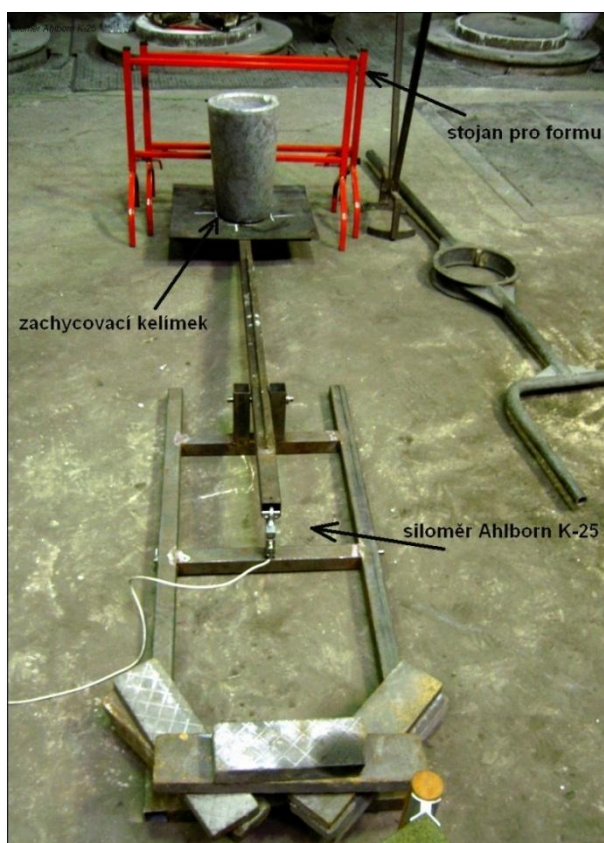
U těchto zkoušek byly vybrány druhy filtrů prolévány hliníkovou taveninou a měřena hmotnost prolitého kovu v závislosti na čase. Cílem bylo zjistit křivky průběhu plnění formy a následně určit hydraulické odpory jednotlivých filtrů.

Záměrem bylo testovat filtry v provozních podmínkách, kde je zajištěna „konstantní“ kvalita a teplota taveniny po celou dobu měření. Pro zkoušky byla vybrána slévárna KOVOLIT Česká, spol. s r.o.

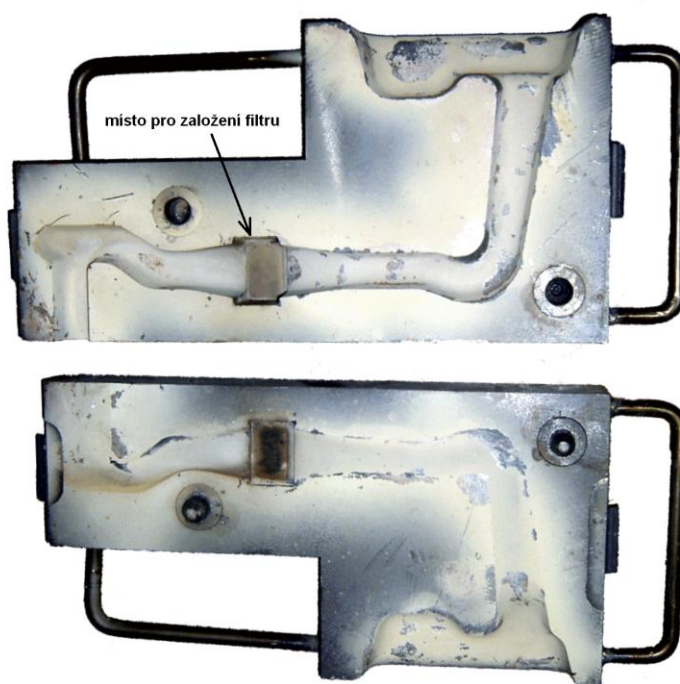
3.2.1 Použitá zařízení

Kov byl taven ve dvou elektrických odporových pecích o kapacitě 200 kg taveniny. Roztavená slitina byla odebírána přímo z pece a lita do průchozí kovové formy. Výkres formy je v příloze P1 a P2 a fotografie formy na obr. 3.2. Na výstupu z formy byla tavenina zachycována do kelímku, umístěném na vážicím zařízení.

Vážicí zařízení se skládalo ze speciálního pákového přípravku, na jehož delším konci byl umístěn kelímek pro zachycení protečeného kovu a na kratším konci pak siloměr Ahlborn K-25, jenž po připojení na přístroj Almemo 2990-4 umožňuje měřit hmotnost kovu protečeného filtrem v závislosti na čase. Siloměr Ahlborn K-25 má rozsah měření 0-5 kN a přesnost 0,1%. Přístroj Almemo umožňuje snímání po 1 sekundě. Pákový přípravek má jedno rameno délky 1200 mm a druhé 400 mm, tudíž pákový poměr je 3:1. To znamená, že každá síla působící na jeho rameno je zaznamenávána jako 3krát větší. Celá výše popsaná sestava je zobrazena na obr. 3.1. Pro měření teploty taveniny byl použit termočlánek napojený na THERM 2280-2.



Obr. 3.1 Měřící sestava.



Obr. 3.2 Kovová průchozí forma pro prolévání filtrů.

3.2.2 Zkoušené filtry

Pěnové keramické filtry dodala firma Igor Láník - Techservis Boskovice. Zkoušeny byly dva typy filtrů určené pro filtraci hliníkových slitin:

VUKOPOR A (20 a 30 PPI):

Technická data [20]:

Ochranná známka:	VUKOPOR® A
Chemické složení (hlavní složky):	Al ₂ O ₃ , SiO ₂
Vazba:	keramická
Barva:	bílá
Pórovitost:	20, 30 PPI (pórů na lineární palec)
Maximální teplota použití:	1350°C
Tvar:	čtvercový
Rozměry:	35x35x22 mm
Rozměrové tolerance:	+0/-2 mm
Rovinnost:	povolený průhyb max. 1 mm
Odchyłka od pravoúhlosti:	max. 1°
Kapacita*:	>10 kg (20 PPI) >9 kg (30 PPI)
Licí rychlost*:	>0,5 kg

VUKOPOR LD (20 a 30PPI):

Technická data [21]:

Ochranná známka:	VUKOPOR® LD
Chemické složení (hlavní složky):	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , grafit
Barva:	černá
Pórovitost:	20, 30 PPI (pórů na lineární palec)
Maximální teplota použití:	850 °C
Tvar:	čtvercový
Rozměry:	35x35x22 mm
Rozměrové tolerance:	+0/-2 mm
Rovinnost:	povolený průhyb max. 1 mm
Odchyłka od pravoúhlosti:	max. 1°
Kapacita*:	>10 kg (20 PPI) >9 kg (30 PPI)
Licí rychlost*:	>0,5 kg

* Hodnoty kapacity a licí rychlosti jsou uvedeny na základě dosavadních měření a poznatků firmy Igor Láník - Techservis Boskovice a mohou se měnit v závislosti na konkrétních podmínkách ve slévárnách:

- typ slitiny,
- teplota kovu,
- úroveň znečištění kovu,
- uložení filtru ve vtokové soustavě apod.

Uzavřené póry, trhliny a díry na pracovních plochách filtru jsou nepřijatelné. Boční stěny filtru mohou být plošně vyplněny keramikou.

Lisované keramické filtry dodala firma KERAMTECH, spol. s r.o. a to ve třech typech 0818, 0733, 0748. Rozměry filtrů byly upraveny na požadované rozměry pro založení do kovové formy (35x35 mm).

0818:

Technická data [22]:

Materiál:	PYROSTAT (40% Mullit)
Barva:	světle hnědá
Maximální teplota použití:	1450 °C
Tvar:	čtvercový
Původní rozměry:	37,1x37,1x9,5
Počet otvorů:	328
Celková plocha otvorů:	579,6 mm ²
Průtočná plocha:	48,6 %

Rozměry upraveny na:	35x35x9,5 mm
Rozměrové tolerance:	+1/-1 mm
Počet otvorů po úpravě rozměrů:	312
Průměr otvorů:	1,5 mm
Celková plocha otvorů*:	551 mm ²
Průtočná plocha*:	45 %

0733:

Technická data [22]:

Materiál:	PYROSTAT (40% Mullit)
Barva:	světle hnědá
Maximální teplota použití:	1450 °C
Tvar:	čtvercový
Původní rozměry:	37x37x9,5 mm
Počet otvorů:	168
Celková plocha otvorů:	639 mm ²
Průtočná plocha:	57,6 %

Rozměry upraveny na:	35x35x9,5 mm
Rozměrové tolerance:	+1/-1 mm
Počet otvorů po úpravě rozměrů:	168
Průměr otvorů:	2,2 mm
Tolerance průměru otvorů:	±0,15 mm
Celková plocha otvorů*:	639 mm ²
Průtočná plocha*:	52,2 %

* Hodnoty celkové plochy otvorů a průtočné plochy jsou přepočítány pro upravené filtry na rozměry 35x35. Materiálový list keram. hmoty PYROSTAT je uveden v příloze P6.

0748:**Technická data [22]:**

Materiál:	PYROSTAT (40% Mullit)
Barva:	světle hnědá
Tvar:	čtvercový
Původní rozměry:	55x55x12,7 mm
Počet otvorů:	314
Celková plocha otvorů:	1541 mm ²
Průtočná plocha:	65 %
Rozměry upraveny na:	35x35x12,7 mm
Rozměrové tolerance:	+1/-1 mm
Počet otvorů po úpravě rozměrů:	161
Průměr otvorů:	2,5 mm
Tolerance průměru otvorů:	±0,15 mm
Celková plocha otvorů:	790 mm ²
Průtočná plocha*:	64,5 %
Maximální teplota použití:	1450 °C

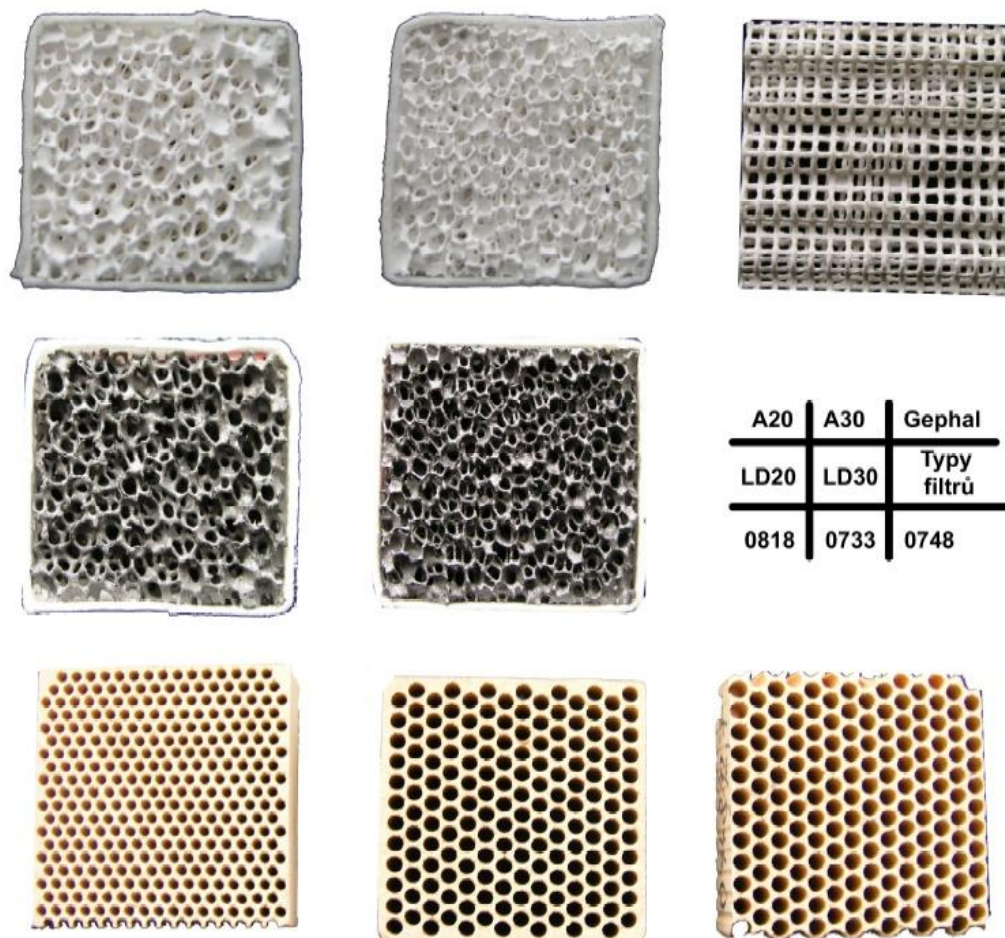
Profilované filtry pro hliníkové odlitky GEPHAL® vyrábí firma Hüttenes-Albertus. Rozměry filtrů byly upraveny na požadované rozměry pro založení do kovové formy.

GEPHAL 2A 050/050: (10 PPI)**Technická data [23]:**

Materiál:	skelná vlákna pokrytá vrstvou speciálního anorganického polymeru
Barva:	bílá
Tvar:	čtvercový
Původní rozměry:	50x50x6,3 mm
Rozměry upraveny na:	35x35x6,3 mm
Počet vrstev:	2
Rozměry otvorů:	2x2 mm
Počet otvorů na cm ² :	12,5
Průtočná plocha:	50 %
Průměr vláken:	0,7 mm
Kapacita*: (v závislosti na lici výšce H)	H=1 dm ... 7,35 kg H=3 dm ... 13,23 kg H=5 dm ... 17,15 kg

* Hodnoty kapacity jsou uvedeny na základě dosavadních měření a poznatků firmy Hüttenes-Albertus a přepočítány na zmenšenou plochu filtru. Mohou se měnit v závislosti na konkrétních podmínkách ve slévárnách:

- typ slitiny,
- teplota kovu,
- úroveň znečištění kovu,
- uložení filtru ve vtokové soustavě apod.



Obr. 3.2 Typy zkoumaných filtrů.

3.2.3 Použité slitiny

Nejprve byla odebírána z první pece slitina AlSi9Cu3. Její chemická analýza je uvedena v tab. 3.1. Vzorky z první pece jsou označeny čísly 1 až 17. Po vyčerpání taveniny v první peci, byla použita slitina AlSi12Cu z druhé pece. Její přibližné chemické složení je uvedeno v tab. 3.2. A vzorky jsou označeny čísly 21 až 24.

Tab. 3.1 Chemická analýza slitiny AlSi9Cu3.

Obsah prvků (%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
10,22	0,54	2,11	0,261	0,247	0,285	0,037	0,0198	0,0183
Sn	Ti	Ag	B	Be	Bi	Ca	Cd	Na
0,0091	0,0666	0,0012	<0,0002	0,0001	0,0031	0,0007	<0,0003	0,0001
P	Sr	Li	Zr	Co	V	Ga	Al	
0,0021	0,0001	0,0001	0,0031	0,0016	0,0065	0,0105	86,8	

Tab. 3.2 Chemické složení slitiny AlSi12Cu [3].

	Obsah prvků (%)												Obsah nečistot (%)	
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Pb	Zn	Ti	Ni	Sn	Ti	jeden prvek	celkem
min.	10,5			0,05										
max.	13,5	0,8	1	0,55	0,35	0,1	0,2	0,6	0,15	0,3	0,10	0,2	0,05	0,25

3.2.4 Průběh měření

Do kovové formy byly postupně zakládány jednotlivé filtry a prolévány taveninou. Roztavená slitina byla odebírána naběračkou přímo z pece a lita do průchozí kovové kokily tvořící vtokovou soustavu se založeným filtrem. Obr. 3.2 ukazuje kovovou formu s místem pro založení filtru. Kov zachycený v kelímku po protečení filtrem byl průběžně vážen na vážícím zařízení a přírůstek hmotnosti po vteřinách zaznamenáván přes siloměr Ahlborn K-25 přístrojem Almemo 2990-4. Zalité filtry i s celou ztuhlou vtokovou soustavou byly vyjímány z formy, označovány čísly 1 až 17 (slitina AlSi9Cu3 z první pece), resp. 21 až 24 (slitina AlSi12Cu z druhé pece) a připravovány pro pozdější metalografické vyhodnocení. Zároveň byl ze zachycovacího kelímku odebírán vzorek taveniny pro zjištění % naplynění.

Teplota taveniny na počátku lití byla 745°C. Nejprve byla forma prolita bez filtru a následně s jednotlivými druhy filtrů. U prvních pěti filtrů docházelo velice rychle k zatuhnutí kovu v kokile a množství prolitého kovu bylo velmi malé. Izolační nátěr kokily byl vyhodnocen jako neúčinný a mezi 6. a 7. filtrem byla forma nastříkána novým izolačním nástřikem CG-555-Achesol.

Filtrem č. 7 ještě protéklo příliš malé množství taveniny, aniž by docházelo k jeho ucpávání, což přisuzuji příliš chladné formě, která byla ochlazená nástřikem a následnému „zamrznutí“ proudu kovu v kokile. Další filtry už ale prokazovaly předpokládaný průtok a většinou nedocházelo k jejich ucpávání ani při protečení celého objemu slitiny, daného objemem naběračky. Teplota taveniny byla průběžně měřena přístrojem THERM 2280-2 a zaznamenávána.

Po měření č. 17 byla vypotřebována všechna slitina AlSi9Cu3 v 1. peci a další slitina AlSi12Cu byla odebírána z 2. pece. Měření, vzorky pro DI a zalité filtry slitinou AlSi12Cu jsou označovány č. 21 až 25. Před proléváním filtru č. 23 byla tavenina rafinována 764 g přípravku EKOSAL Al 113 od firmy Promet.

3.2.5 Naměřené hodnoty

3.2.5.1 Průběh průtoku kovu

Data zaznamenaná přístrojem Almemo 2990-4 v kN/s byla v programu Microsoft Excel převedena na kg/s, podle poměru 1 kN = 35 kg určeného vážením. Dále byla odečtena hmotnost zachycovacího kelímku a hmotnostní průtok v kg/s v celé ploše filtru přepočítán na 1 cm² filtru podle rovnice (3.1).

$$\frac{\text{Hmotnostní průtok celou plochou filtru}}{\text{Průtočná plocha na výstupu z filtru}} = \text{Hmotnostní průtok jedním cm}^2 \text{ filtru} \quad (3.1)$$

, kde Hmotnostní průtok celou plochou filtru jsou hodnoty v kg/s dané měřením. Průtočná plocha na výstupu z filtru $S_{\text{výst.}}$ je dána velikostí kanálu* za filtrem.

$$S_{\text{výst.}} = 2,6 \times 2,9 \text{ cm}$$

$$S_{\text{výst.}} = 7,54 \text{ cm}^2$$

* Rozměry kanálu byly odměřeny přímo z formy a jsou zakótovány ve výkresu formy v příloze P1

Z naměřených hodnot byly pro vyhodnocení vybrány měření č. 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17 (slitina AlSi9Cu3, 1. pec) a č. 21, 22, 23, 24 (slitina AlSi12Cu, 2. pec), protože u ostatních měření docházelo k zatuhnutí proudu taveniny ve formě a výsledné hodnoty průtoku byly příliš malé, jak bylo popsáno v předchozí kap. 3.2.4. Tab. 3.3 v příloze P3 a tab. 3.4 v příloze P4 ukazují hodnoty průtoku u vybraných měření.

3.2.5.2 Teplota taveniny

Teplota taveniny byla sledována v průběhu měření. Zaznamenané hodnoty teploty taveniny ukazuje tab. 3.5.

Tab. 3.5 Teplota taveniny.

č. měření	1	4	5	8	17	21
teplota taveniny (°C)	745	748	756	780	740	760

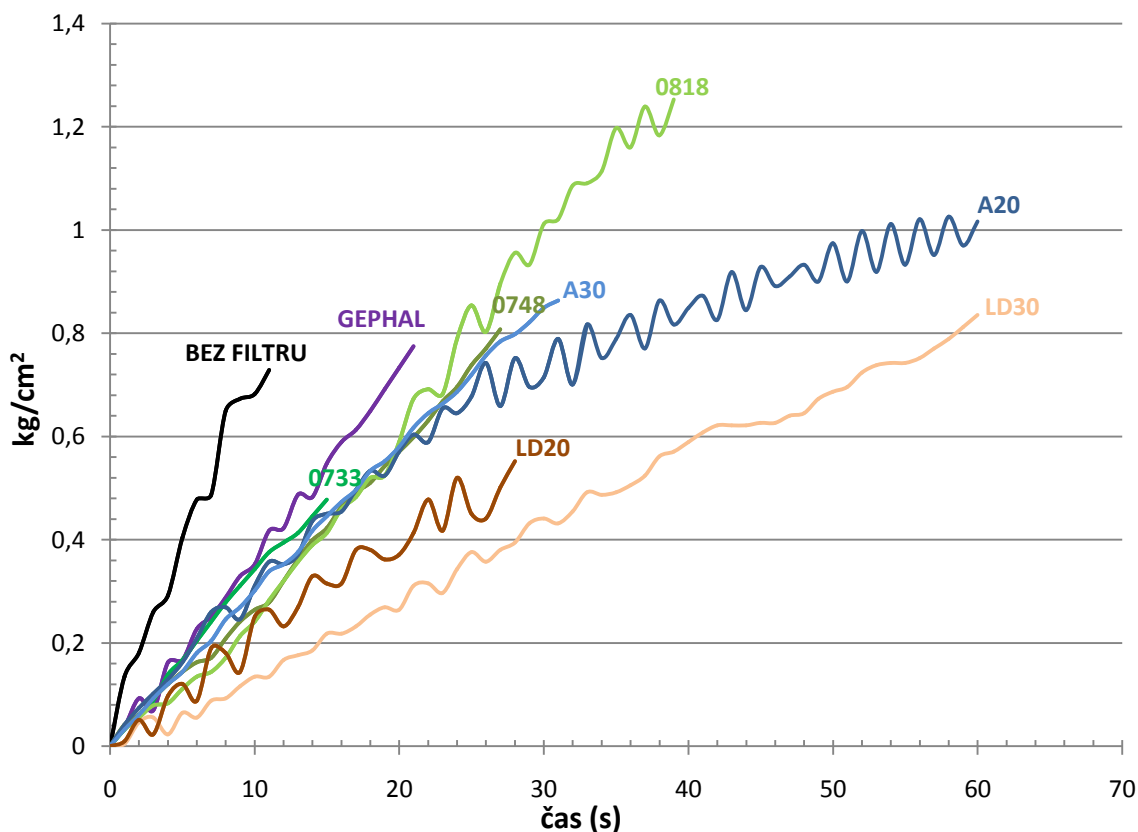
3.2.6 Vyhodnocení

Jelikož byly odlévány dvě různé slitiny, je vyhodnocení rozděleno na dvě části.

3.2.6.1 slitina AISi9Cu3

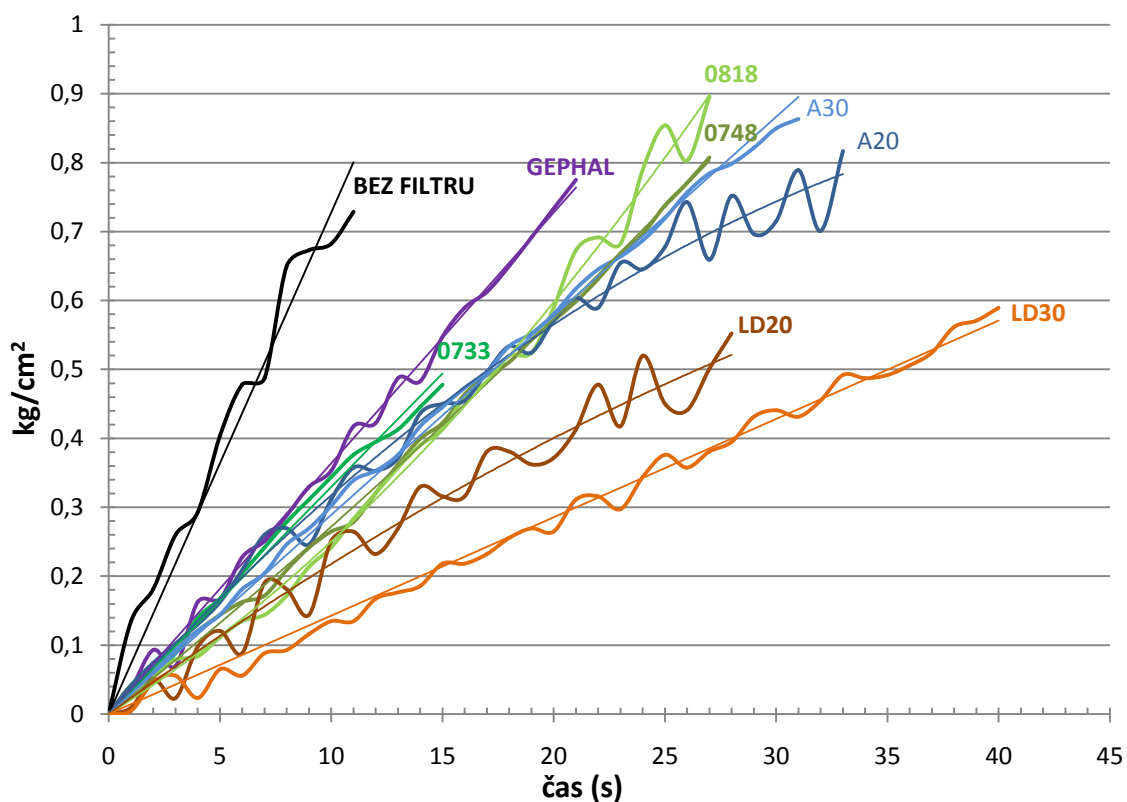
Tab. 3.6 Vyhodnocení zkoušek průtočnosti filtrů.

č. vz.	filtr	teplota kovu	max. prolité množství (kg/cm ²)	doba lití (s)	licí rychlost	spolehlivost R ²
1 - 7	odlévání do ustálení teploty formy					
8	0748	780°C	0,808	27	$m_{\text{sec}}=0,028\tau$	R ² =0,995
9	0733		0,478	15	$m_{\text{sec}}=0,032\tau$	R ² =0,964
10	GEPHAL		0,775	21	$m_{\text{sec}}=0,036\tau$	R ² =0,996
11	A30		0,863	31	$m_{\text{sec}}=0,028\tau$	R ² =0,998
12	LD30		0,836	60	$m_{\text{sec}}=0,014\tau$	R ² =0,993
13	A20		1,017	60	$m_{\text{sec}}=-1,98E^{-4}\tau^2+0,035\tau$	R ² =0,988
14	bez filtru		0,729	11	$m_{\text{sec}}=0,072\tau$	R ² =0,964
15	příliš malé množství prolitého kovu					
16	LD20		0,520	36	$m_{\text{sec}}=-2E^{-5}\tau^2+0,023\tau$	R ² =0,966
17	0818	740°C	1,253	39	$m_{\text{sec}}=6,93E^{-4}\tau^2+0,02\tau$	R ² =0,994

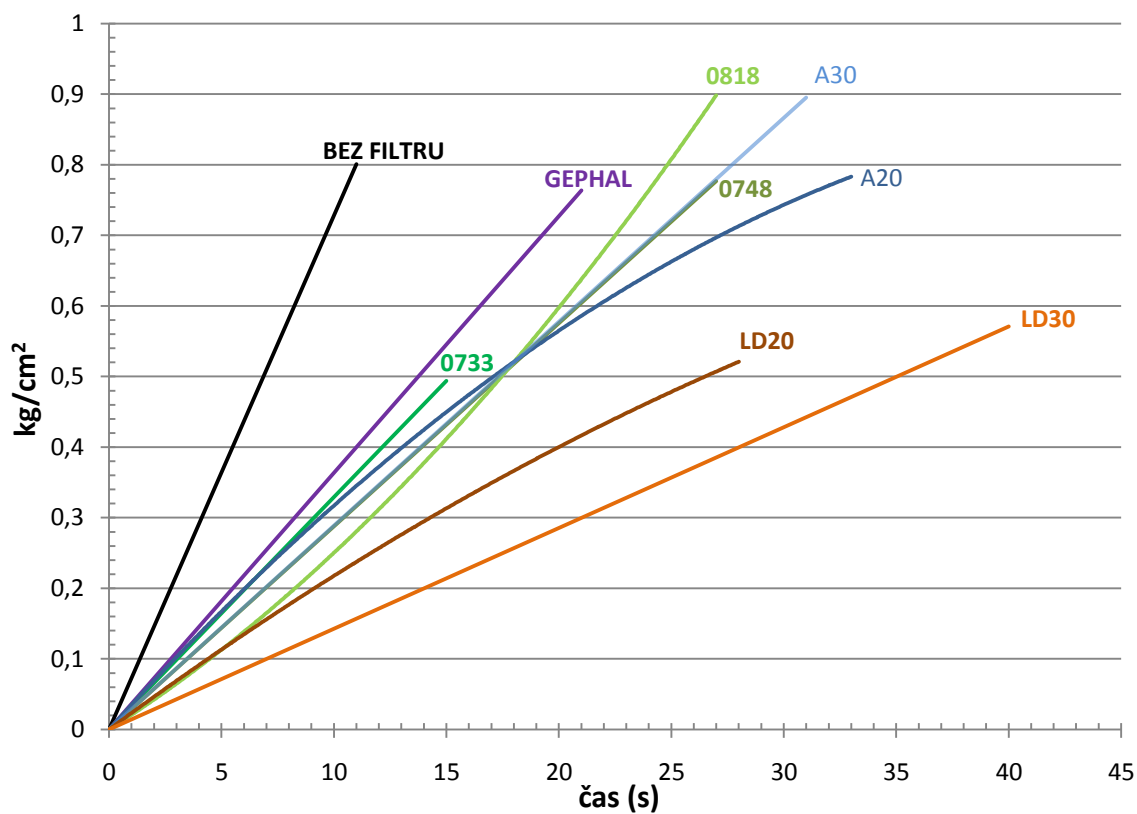


Graf 3.1 Průběhy plnění zachycovacího kelímku.

Pozn.: Ostatní grafy jsou zobrazeny se zkrácenými průběhy u filtrů 0818, A20 a LD30.



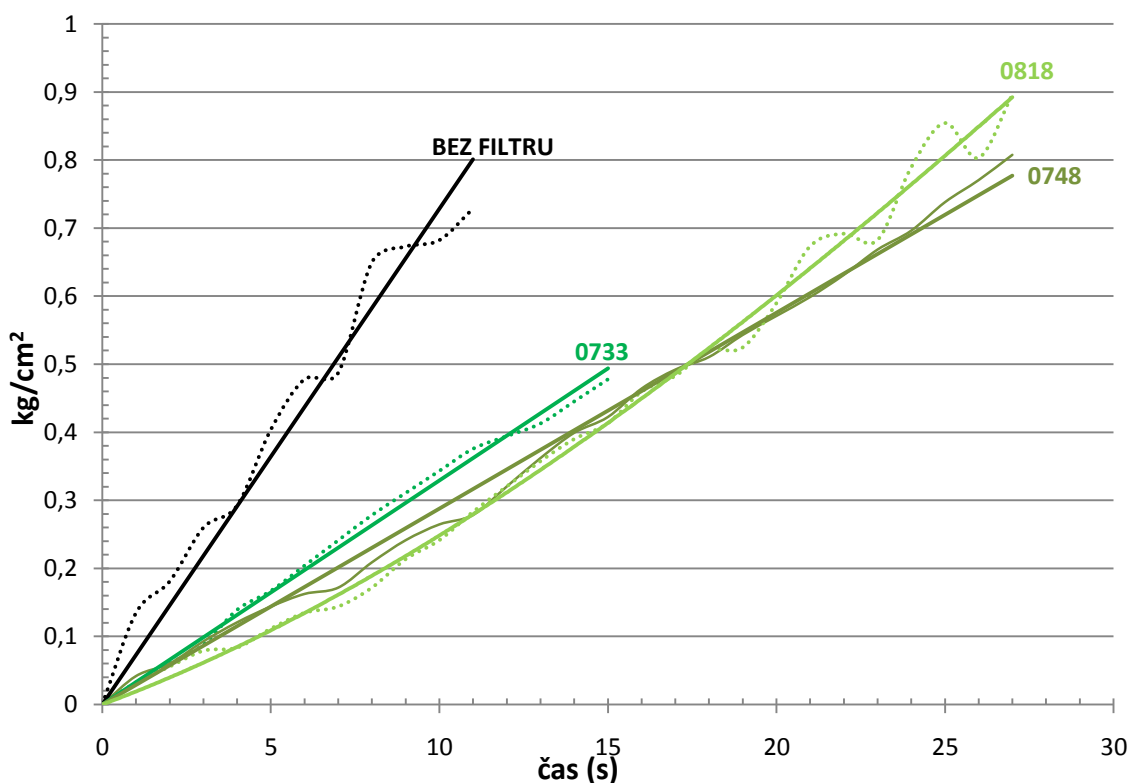
Graf 3.2 Průběhy plnění zachycovacího kelímku proložené spojnicemi trendu.



Graf 3.3 Spojnice trendů průtoků jednotlivými druhy filtrů.

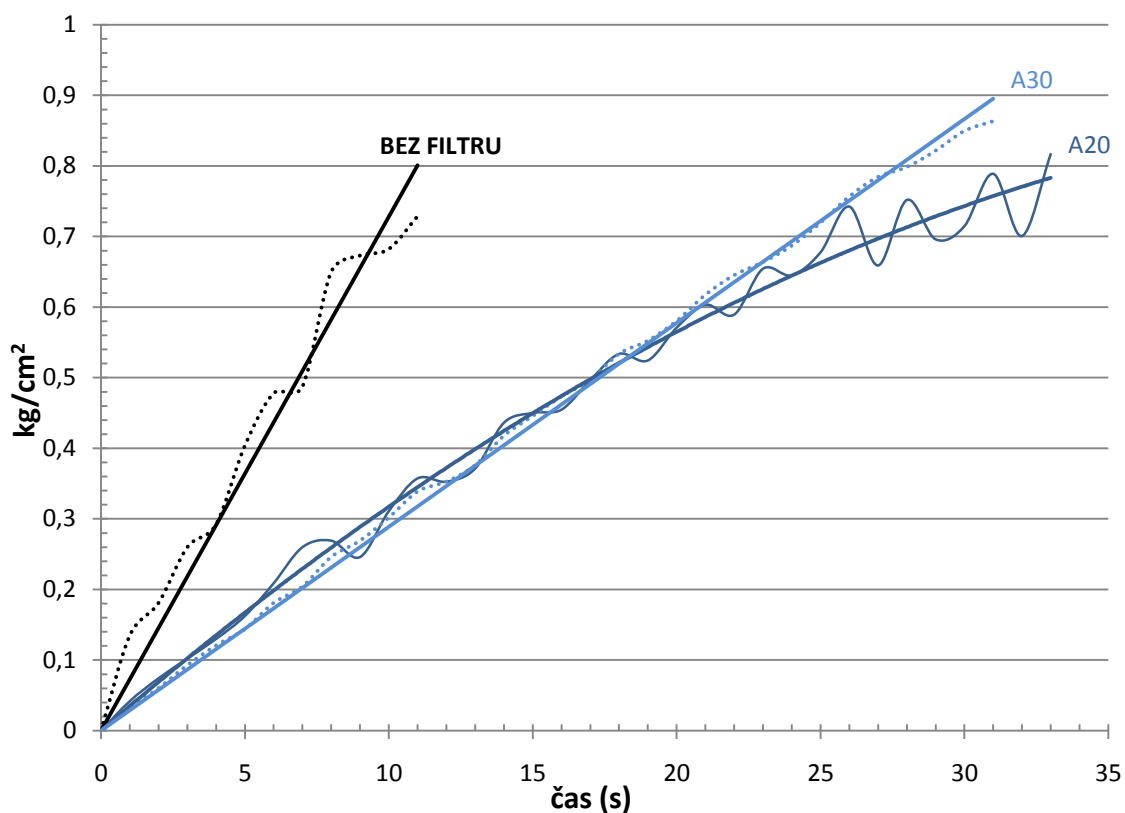
Z grafu 3.3 je patrné, že průtok většiny druhů zkoušených filtrů má lineární charakter, nedocházelo tedy k jejich ucpávání vměstky. Mírně polynomický charakter vykazují spojnice trendů filtrů LD20 a A20, u těchto filtrů docházelo k ucpávání vměstky. Opačný polynomický průběh má křivka lisovaného filtru 0818. U tohoto filtru tedy docházelo ke zvyšování průtoku.

Lisované a pěnové filtry třídy A vykazují podobné průběhy průtoků. Po filtru GEPHAL měl největší průtok lisovaný filtr 0733 s průměrem otvorů 2,2 mm a průtočnou plochou 52,2%, následovaný filtrem A20 (20 PPI). Filtr 0748 s průměrem otvorů 2,5 mm a průtočnou plochou 64,5% a filtr A30 (30 PPI) mají takřka stejné průběhy průtoků. Filtr 0818 s průměrem otvorů 1,5 mm a průtočnou plochou 45% má do 19 sekundy nejnižší průtok z lisovaných filtrů, ale poté se jeho průtok zvýšil, což si nedokážu vysvětlit. Průběh zvětšování průtoku je plynulý, může být tedy způsobeno postupným prohříváním filtru a formy.

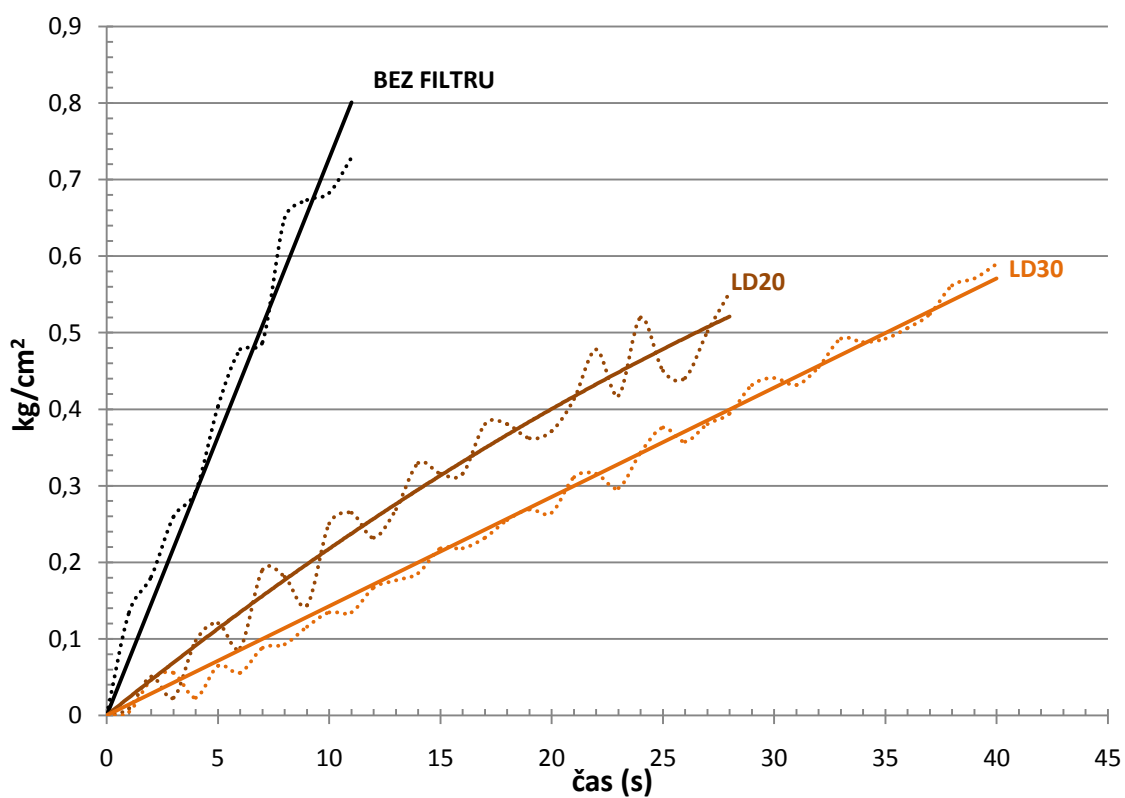


Graf 3.4 Průběhy průtoku taveniny lisovanými filtry.

Zkoušené lisované filtry měly následující průtočnou plochu 0748 (64,5 %), 0733 (52,2 %), 0818 (45 %). Pokud tedy vycházíme z předpokladu, že by filtry měly vykazovat průtok přímo úměrný jejich průtočné ploše, pak by průběhy průtoků měly mít následující sestupné pořadí. Od největšího průtoku filtrem 0748, přes filtr 0733, k nejmenšímu průtoku přes filtr 0818. Měření však ukazují, jak je vidět v grafu 3.4, že křivka filtru 0733 má větší růst hodnot v čase než křivka filtru 0748. To může být způsobeno chybou, která by se odstranila větším počtem zkoušených filtrů stejného typu a statistickým vyhodnocením.



Graf 3.5 Průběhy průtoku taveniny pěnovými filtry typu A.



Graf 3.6 Průběhy průtoku taveniny pěnovými filtry typu LD.

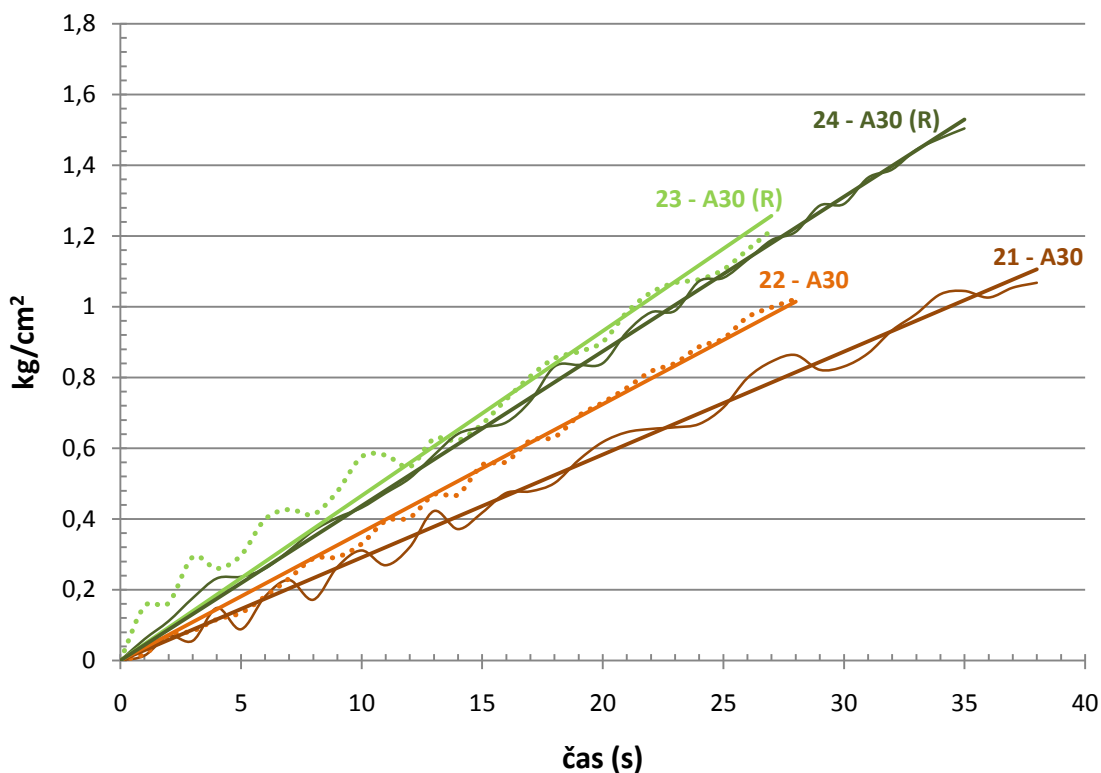
Pěnové filtry řady A v grafu 3.5 vykazují předpokládaný průběh průtoku. Na začátku lití má větší hodnotu průtoku filtr A20 (20 pórů na čtvereční palec), než filtr A30 (30 pórů na čtvereční palec). Později docházelo k ucpávání filtru A20 a jeho průtok se snížil. Od přibližně 20. sekundy je licí rychlost přes filtr A20 nižší než filtrem A30, který se neucpával. Stejně tak v grafu 3.6 vykazuje větší průtok filtr s menší hustotou pórů LD20, než filtr LD30.

Dle katalogu filtrů firmy Láník - Techservis Boskovice mají filtry řady LD a řady A stejnou rychlost lití. Z výsledků měření je však zřejmé, že filtry LD mají nižší rychlosti lití. To může být způsobeno řadou faktorů: typem slitiny, podmínkami lití a také materiálem filtrů a charakterem zachycovaných vměstků.

3.2.6.2 slitina AlSi12Cu

Tab. 3.7 Vyhodnocení zkoušek průtočnosti filtrů.

č. vz.	filtr	teplota kovu	rafinace	max. prolité množství (kg/cm ²)	doba lití (s)	licí rychlost	spolehlivost R ²
21	A30	760°C		1,068	38	$m_{sec}=0,029\tau$	$R^2=0,991$
22	A30			1,021	28	$m_{sec}=0,036\tau$	$R^2=0,995$
23	A30		R	1,216	27	$m_{sec}=0,046\tau$	$R^2=0,965$
24	A30		R	1,504	35	$m_{sec}=0,043\tau$	$R^2=0,997$



Graf. 3.7 Průběh průtoku slitiny AlSi12Cu přes filtry A30.

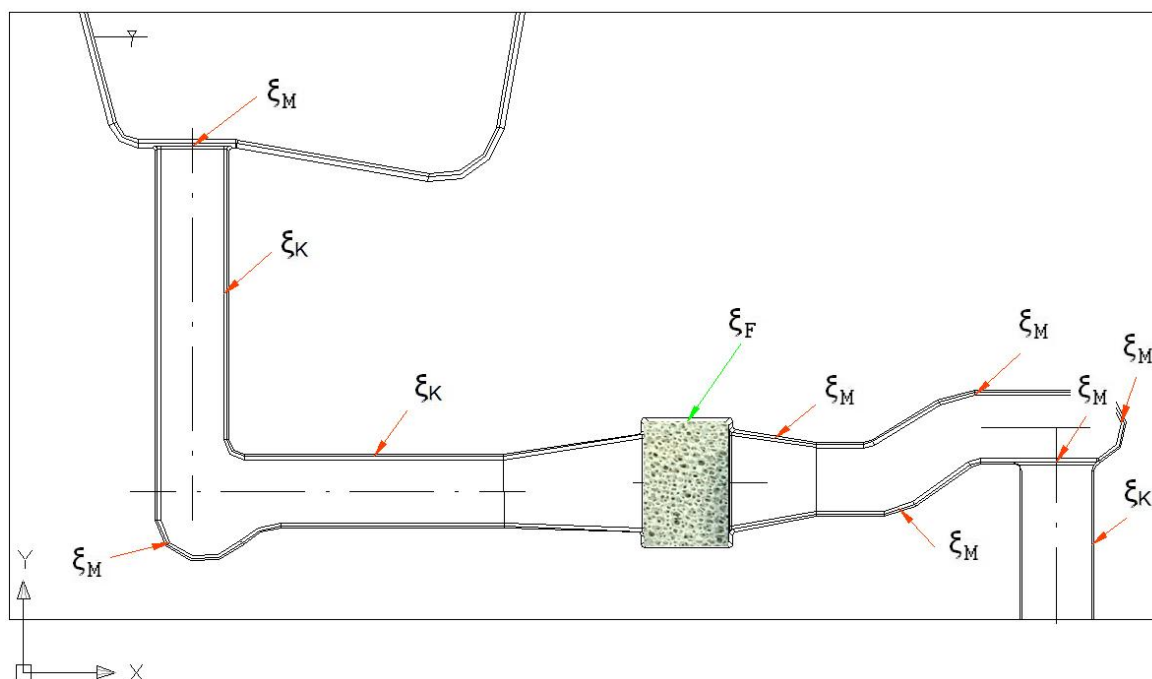
Mezi měření č. 22 a 23 bylo provedeno rafinování taveniny přípravkem EKOSAL Al 113. Zdá se, že po rafinaci se průtok taveniny přes filtry stejného typu zvýšil. Křivky průtoku rafinované taveniny (v grafu 3.7) č. 23 a 24 vykazují větší průtok než křivky nerafinované taveniny č. 21 a 22.

3.2.7 Vliv filtrů na dobu plnění formy

Filtr představuje ve vtokové soustavě formy hydraulický odpor. Tento odpor je daný konstrukcí filtru, jeho polohou ve vtokové soustavě a průběhem jeho zanášení. Pokud posuzujeme odpor filtru, musíme tento odpor posuzovat v rámci celé vtokové soustavy.

Celkové odpory proti tečení kovu jsou složeny z následujících odporů. Odpory v samotné tavenině při jejím turbulentním proudění, které závisí na její viskozitě. Dále pak odpory ve vtokové soustavě, které jsou dány odporem kanálů ξ_K a místními odpory ξ_M , jak vidět z obr. 3.3. Nakonec je do celkových odporů zahrnut také odpor samotného filtru ξ_F . Je zřejmé, že pokud budou odpory vtokové soustavy mnohem větší než odpor filtru ($\xi_K + \xi_M \gg \xi_F$), pak bude odpor filtru celkově zanedbatelný a naopak.

Všechny odpory závisí na rychlosti proudění taveniny. Jsou přímo úměrné její druhé mocnině v_k^2 . Odpor filtru tedy závisí na rychlosti lití, která je dána licími podmínkami (výškou lití, konstrukcí vtokové soustavy atd.). Tuto studii proto nelze chápat obecně pro všechny případy v praxi, ale pouze jako jakési orientační porovnání jednotlivých typů filtrů.



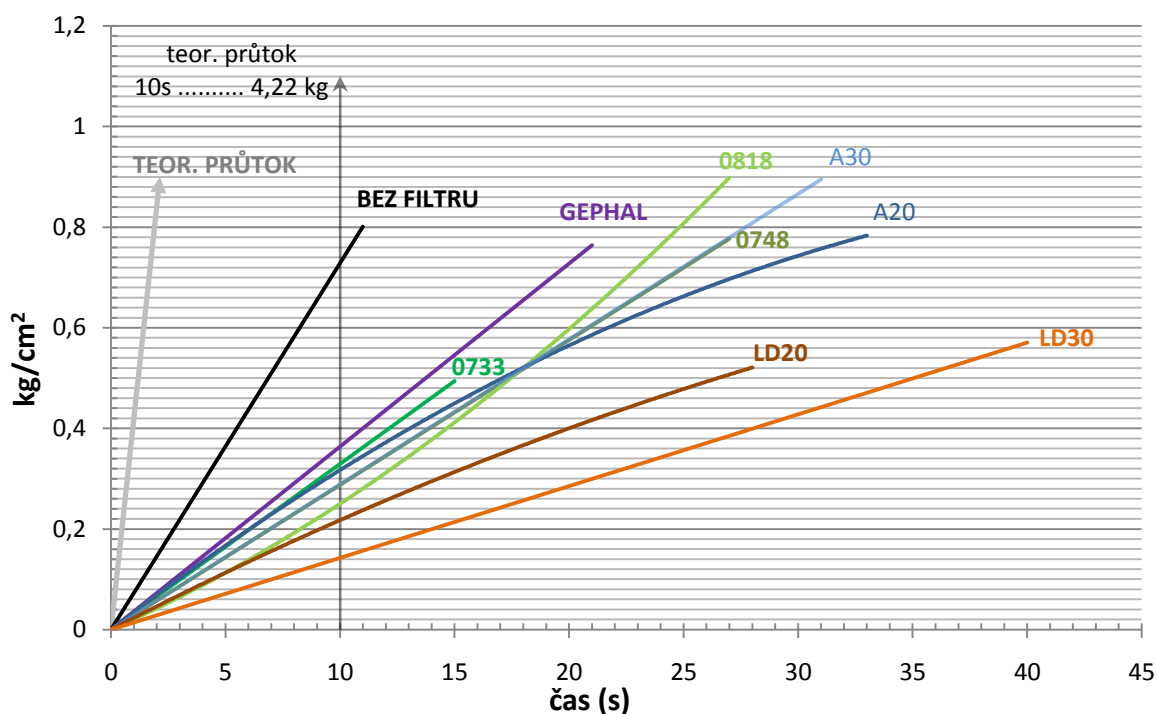
Obr. 3.3 Odpory ve vtokové soustavě.

Vliv filtrů na průtok taveniny a tedy i na rychlost plnění formy nejlépe posuzuje rychlostní faktor filtru. Ten je dán porovnáním rychlosti lití vtokovou soustavou s filtrem a rychlosti lití vtokovou soustavou bez filtru.

Rychlostní faktor filtru:

$$\mu_{\text{filtru}} = \frac{m_{\text{filtru}}}{m_{\text{bez filtru}}} \quad (3.2)$$

, kde m_{filtru} je hmotnost protečené taveniny vtokovou soustavou přes filtr ve zvoleném čase $\tau = 10\text{s}$ odečtená z grafu 3.8.
 $m_{\text{bez filtru}}$ je hmotnost protečené taveniny vtokovou soustavou bez filtru ve zvoleném čase $\tau = 10\text{s}$ odečtená z grafu 3.8.



Graf 3.8 Průběh teoretického průtoku, průtoku formou bez filtru a průtoků jednotlivými typy filtrů.

Abychom mohli posuzovat vliv filtru na celkový odpor, musíme také určit rychlostní faktor vtokové soustavy (v tomto případě kovové průchozí formy).

Rychlostní faktor formy:

$$\mu_{\text{formy}} = \frac{m_{\text{bez filtru}}}{m_{\text{teor.}}} \quad (3.3)$$

, kde $m_{\text{bez filtru}}$ je hmotnost protečené taveniny vtokovou soustavou bez filtru ve zvoleném čase $\tau = 10\text{s}$ odečtená z grafu 3.8.
 $m_{\text{teor.}}$ je teoretická hmotnost v $\tau = 10\text{s}$.

Výpočet teoretického průtoku:

$$m_{\text{teor.}} = S_{\text{říd.}} \cdot v \cdot \rho \cdot \tau \quad (3.4)$$

, kde $S_{\text{říd.}}$ je řídicí průřez vtokové soustavy. Řídicí průřez byl změřen přímo z formy. Rozměry jsou zakótovány ve výkresu formy v příloze P1.

$$S_{\text{říd.}} = 2,0 \times 1,9 \text{ cm}$$

$$S_{\text{říd.}} = 3,8 \text{ cm}^2$$

v je rychlost taveniny v řídicím průřezu $v = \sqrt{2g \cdot H_{\text{úč.}}}$

g je gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$H_{\text{úč.}}$ je účinná licí výška změřená z formy a zakótovaná ve výkresu formy v příloze P1. $H_{\text{úč.}} = 12 \text{ cm}$

ρ je hustota slitiny AlSi9Cu3. $\rho_{\text{AlSi9Cu3}} = 2,75 \text{ kg/dm}^3$ [4].

τ je zvolený čas (s). $\tau = 10\text{s}$.

$$m_{\text{teor.}} = 16,035 \text{ kg}$$

$$m_{\text{teor.}} \text{ na cm}^2 \text{ filtru je } m_{\text{teor.}} / S_{\text{říd.}}$$

$$m_{\text{teor./cm}^2} = 4,22 \text{ kg/cm}^2$$

Celkový rychlostní faktor (filtru a formy):

$$\mu_{\text{celk.}} = \mu_{\text{formy}} \cdot \mu_{\text{filtru}} \quad (3.5)$$

, kde μ_{formy} je rychlostní faktor formy.

μ_{filtru} je rychlostní faktor filtru.

Odpor filtru resp. vtokové soustavy je jiným posouzením vlivu filtru resp. vtokové soustavy na proudění taveniny. Jelikož v této studii tvoří vtokovou soustavu průchozí kovová forma je odpor této formy odporem vtokové soustavy.

Odpor filtru resp. formy (vtokové soustavy):

$$\xi_f = \frac{1}{\mu_f^2} - 1 \quad (3.6)$$

, kde μ_f je rychlostní faktor formy resp. filtru.

Podle výše napsaných vzorců byly vypočítány rychlostní faktory a odpory filtrů a formy (vtokové soustavy) uvedené v tab. 3.8.

Tab. 3.8 Hodnoty rychlostních faktorů a odporů.

	rychlostní faktor formy μ_{formy}	odpor formy ξ_{formy}	celkový rychlostní faktor $\mu_{\text{celk.}}$
forma	0,173	32,418	
filtr	rychlostní faktor filtru μ_{filtru}	odpor filtru ξ_{filtru}	
GEPHAL	0,499	3,022	0,086
9 - 0733	0,452	3,893	0,078
13 - A20	0,434	4,303	0,075
11 - A30	0,396	5,380	0,068
8 - 0748	0,395	5,425	0,068
17 - 0818	0,342	7,526	0,059
16 - LD20	0,299	10,213	0,052
12 - LD30	0,195	25,428	0,034

Z tab. je zřejmé, že nejmenší odpor ve vtokové soustavě tvoří filtr GEPHAL, zatímco filtr LD30 se blíží svým odporem odporu celé vtokové soustavy (formy).

3.3 Vliv filtrace na naplynění taveniny

Jako orientační zkouška bylo provedeno měření naplynění přefiltrované taveniny. Filtrací jsou odstraňovány vměstky, které v roztaveném kovu tvoří zárodky pro tvorbu plynových bublin. Snížením množství vměstků v tavenině, bychom tedy měli snížit počet možných zárodků pro nukleaci bublin v odlitku. Navíc filtrací odstraňujeme bubliny, které se naváží na vměstky už před filtrem. Určení procenta naplynění se provádí pomocí tzv. Reducer pressure testu (RPT test).

3.3.1 Použité zařízení

K vakuování bylo použito zařízení NDLC a vzorky byly váženy na digitální váze MK 2200, která má v sobě přímo zabudované počítačové zařízení s algoritmem pro určení DI.

3.3.2 Postup měření

Pomocí RPT testu dokážeme určit naplynění taveniny. Je to rychlá provozní zkouška pro zjištění kvality taveniny. Měření je na principu dvojího vážení dvou vzorků. Jednoho ztuhlého při atmosférickém tlaku a druhého ztuhlého při tlaku 8 kPa [24]. Obr. 3.4 ukazuje v levé části vzorek ztuhlý při atmosférickém tlaku a v pravé části při tlaku 8 kPa. Vzorky jsou lity do zkušebních kelímků, a jak je patrné z obr. 3.5, jeden je vakuován v přístroji NDLC a druhý tuhne na odkladové desce přístroje při atmosférickém tlaku.



Obr. 3.4 Vzorky pro určení DI [24].



Obr. 3.5 Přístroj NDLC

Ztuhlé vzorky se váží vahou MK 2200, která je zobrazena na obr. 3.6. Na principu Archimédova zákona se určí jejich hustota. Porovnáním těchto hustot, dle rovnice (3.7), získáme míru naplynění v [%], tzv. index hustoty DI (Dichte Index).

$$DI = \frac{d_a - d_{80}}{d_a} \cdot 100 \quad (3.7) [24]$$

, kde d_a je hustota vzorku ztuhlého za atmosférického tlaku.
 d_{80} je hustota vzorku ztuhlého za podtlaku.



Obr. 3.6 Váha MK 2200 [24].

3.3.3 Naměřené hodnoty

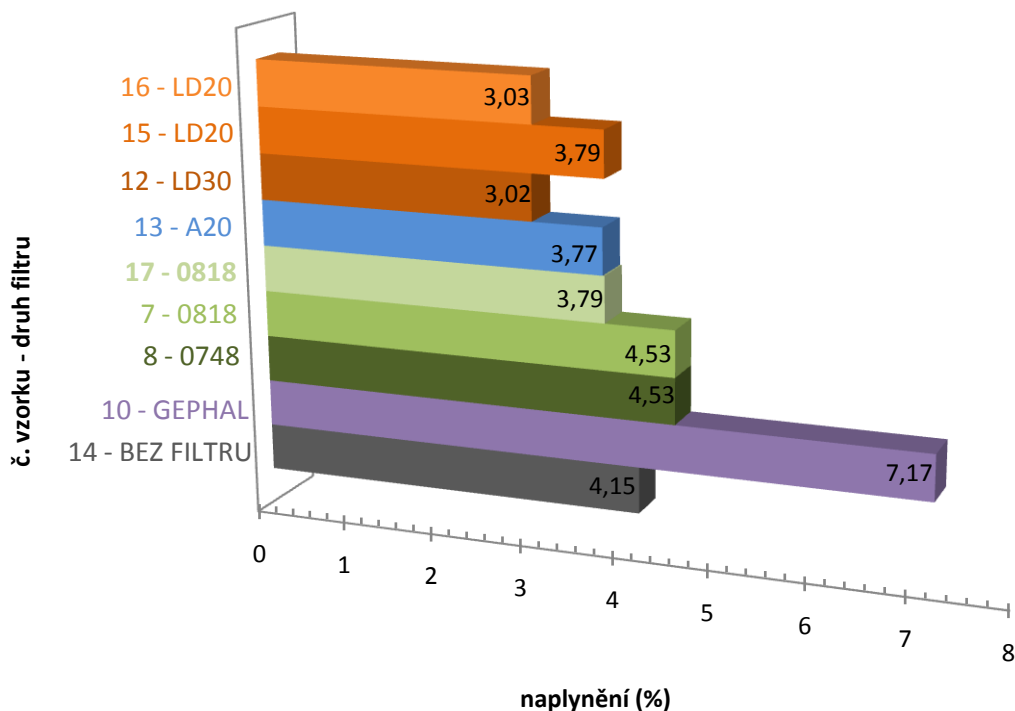
Naměřené hodnoty Dichte Indexu pro vybrané vzorky jsou uvedeny v tab. 3.9. Z tabulky byly vyřazeny hodnoty vzorků č. 1 až 6, které vykazovaly vysoké naplynění způsobené nejspíš nástřikem formy a malým množstvím prolité taveniny do zachycovacího kelímku. U měření č. 9 a 11 nebyl vzorek taveniny pro určení naplynění odebírán. Vzorek číslo 25 byl odebírán přímo z 2. pece, tavenina tedy nebyla prolévána formou.

Tab. 3.9 Hodnoty Dichte Indexu vybraných vzorků.

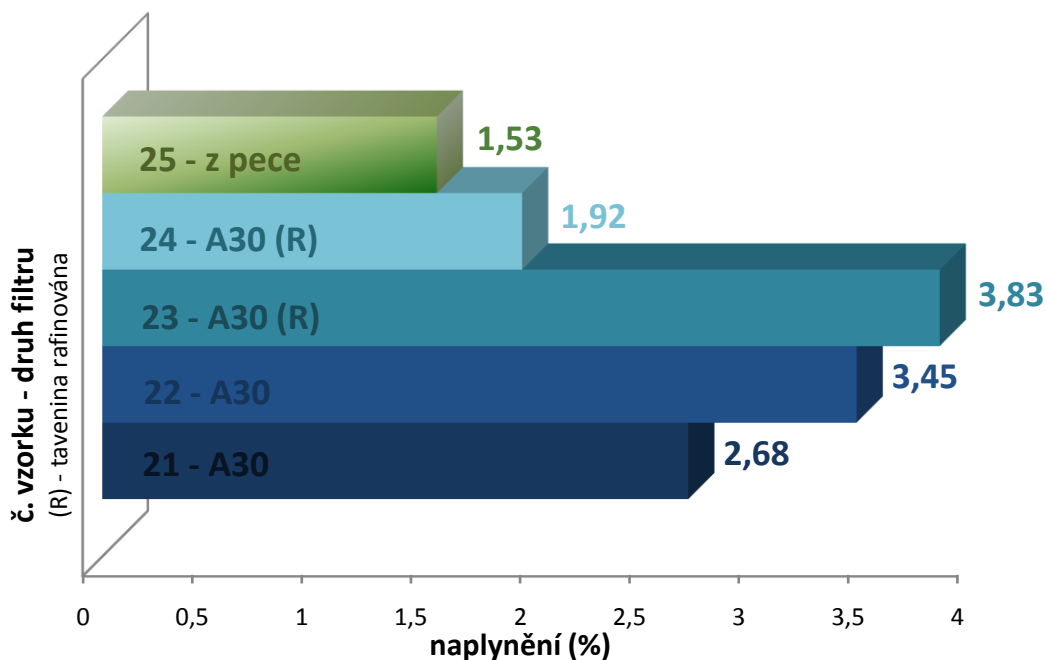
slitina AlSi9Cu3 (1. pec)									
č. vzorku	7	8	10	12	13	14	15	16	17
druh filtru	0818	0748	gephal	LD30	A20	bez filtru	LD20	LD20	0818
naplynění (%)	4,53	4,53	7,17	3,02	3,77	4,15	3,79	3,03	3,79
slitina AlSi12Cu (2. pec)									
č. vzorku	21	22	23	24	25				
druh filtru	A30	A30	A30 [R]	A30 [R]	přímo z pece [R]				
naplynění (%)	2,68	3,45	3,83	1,92	1,53				

[R] – tavenina rafinována přípravkem EKOSAL AI 113

Z výsledků naplynění vzorků odlitých ze slitiny AlSi9Cu3 zpracovaných do grafu 3.9 nelze vyvodit jednoznačné tvrzení o vlivu různých typů filtrů na naplynění taveniny. Tato studie vyžaduje velký počet odlitých vzorků a statistické vyhodnocení.



Graf. 3.9 Naplynění vzorků ze slitiny AlSi9Cu3 (1. pec).



Graf 3.10 Naplynění vzorků ze slitiny AlSi12Cu (2. pec).

Slitinou AlSi12Cu byly prolévány filtry A30. Vzorky 23, 24 a 25 jsou odlity z rafinované taveniny, přičemž vzorek 25 je odebírán přímo z pece (neproléván přes filtr). Rafinace taveniny podle výsledků tohoto měření nemá na naplynění taveniny žádný vliv. Zároveň porovnáním DI vzorku 25 s ostatními, docházíme k závěru, že jakýkoli pohyb taveniny (přelévání) zvyšuje její naplynění.

3.4 Zkoušky průtočnosti filtrů se zmenšenou průtočnou plochou

Po prvních zkouškách proléváním filtrů bylo zjištěno, že s použitým objemem roztaveného kovu, který je daný objemem naběračky, nejsme schopni dosáhnout postupného zanášení filtrů. Většina průběhů hmotnosti prolité taveniny v grafu 3.3 má lineární charakter. Pokud by docházelo k zanášení filtru vměstky, měl by průběh polynomický charakter druhého stupně, jak je tomu např. u filtru A20.

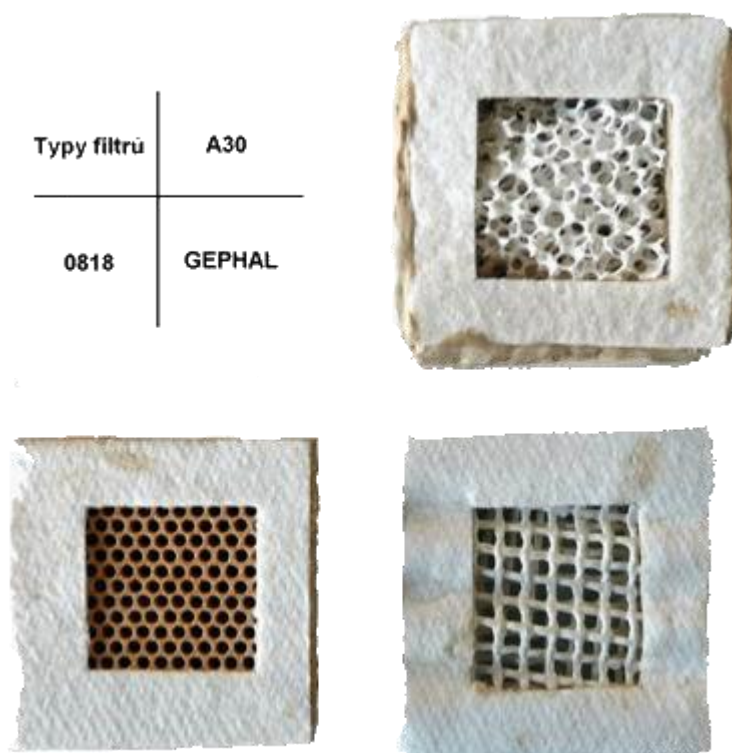
Při zkouškách jsme však technicky omezeni kapacitou pecí, objemem naběračky, objemem zachycovacího kelímku atd. Bylo proto určeno, že další experiment prolévání filtrů bude proveden s filtry se zmenšenou průtočnou plochou. Zmenšení průtočné plochy filtrů bylo provedeno lepením nehořlavé tkaniny, jak je popsáno dále v kap. 3.4.2. Měření se uskutečnilo v laboratorní slévárně Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

3.4.1 Použitá zařízení

Slitina byla tavena v elektrické odporové peci LAC M30S (320 V) v jílografitovém kelímku. Měřicí sestava i kovová průchozí forma pro založení filtru byly stejné, jak jsou popsány v kap. 3.2.1. Navíc byly filtry a forma ohřívány v žíhací peci K125 S (7,5 kW) o max. teplotě 1280°C. Dotykovým termočlánkem byla měřena teplota formy. Klasickým ponorným termočlánkem byla měřena teplota taveniny. Oba termočlánky byly napojeny na přístroj THERM 2280-2.

3.4.2 Zkoušené filtry

Pro zkoušky byly vybrány filtry pěnové A30, GEPHAL a lisovaný filtr 0818, které jsou podrobně popsány v kap. 3.2.2. Aby byl více znatelný průběh ucpávání filtrů a aby se zvýšila hustota zachycených vměstků na sledované ploše, byla průtočná plocha filtrů zmenšena na 2 cm², tedy na čtverec 2x2 cm, jak je vidět na obr. 3.7. To bylo provedeno nehořlavou tkaninou od firmy Láník - Techservis Boskovice, kterou se běžně oblepují pěnové keramické filtry. U lisovaných keramických filtrů, kde je zajištěn přímý průtok pouze průchozími kanály a u filtru GEPHAL, byla zalepena pouze čelní plocha filtru. Keramické pěnové filtry, kde dochází k průtoku taveniny přes buňky v celém objemu filtru, byly nejprve rozřezány, tak aby vznikl uprostřed filtru kvádr o podstavě 2x2 cm. Ten byl následně oblepen a k němu přilepeny ostatní části filtru, přičemž čelní plocha byla znovu zalepena jako v předchozím postupu tkaninou s otvorem 2x2 cm. Vznikl tak uprostřed filtru průchozí kanál o vstupní ploše 4 cm². Tím byl zajištěn průtok taveniny pouze touto plochou.



Obr. 3.7 Typy zkoušených filtrů se zmenšenou průtočnou plochou.

3.4.3 Použitá slitina

Zkoušky byly prováděny se slitinou AlSi9Cu3, jejíž přibližné chemické složení je uvedeno v tab. 3.10

Tab. 3.10 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 [3].

chemické složení %											obsah nečistot %	
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	jeden prvek	celkem
8,0-11,0	1,3	2,0-4,0	0,55	0,05-0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,25	0,05	0,25

3.4.4 Průběh měření

Nejprve byly upraveny průtočné plochy filtrů pomocí nehořlavé tkaniny, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Poté byly oblepené filtry vyžehány v žíhací peci K125 S při teplotě 300°C. Také forma byla ohřátá v žíhací peci. Filtry byly prolévány stejným způsobem, jak je popsáno v kap. 3.2.4. Průběžně byla měřena teplota taveniny a formy před odléváním. Aby nedošlo k záměně vzorků se vzorky odlévanými v kap. 3.2 ve slévárně KOVOLIT Česká, spol. s r.o., byly zalité filtry a data z jednotlivých měření označena čísly 1b až 6b. Při odlévání filtru č. 2b došlo vlivem netěsnosti formy v dělicí rovině k protečení kovu mimo formu. Naměřená data o prolévání toho filtru byla vyřazena z vyhodnocení.

3.4.5 Naměřené hodnoty

3.4.5.1 Průběh průtoku kovu

Získaná data byla převedena na hodnoty průtoku taveniny v kg jednotlivými typy filtrů v závislosti na čase, jak je uvedeno v kap. 3.2.5.1. Dále byl průtok přepočítán podle rovnice (3.8) na kg/cm^2 . Hodnoty průtoku slitiny AlSi9Cu3 přes jednotlivé filtry v závislosti na čase je uveden v tab. 3.11 v příloze P5.

$$\frac{\text{Hmotnostní průtok celou plochou filtru}}{\text{Průtočná plocha filtru}} = \text{Hmotnostní průtok } 1 \text{ cm}^2 \text{ filtru} \quad (3.8)$$

, kde Průtočná plocha filtru je dána plochou vstupního otvoru po úpravě filtrů a je rovna 4 cm^2 .

3.4.5.2 Teplota taveniny

Teplota taveniny byla udržována kolem 730°C . Naměřené hodnoty teploty taveniny jsou uvedeny v tab. 3.12.

Tab. 3.12 Teploty vstupní taveniny.

č. měření	1b	2b	6b
Teplota taveniny ($^\circ\text{C}$)	735	730	735

3.4.5.3 Teplota formy

Teplota formy byla zvyšována v žíhací peci na teploty přes 200°C . Snaha byla udržet teplotu formy na přibližně stejné úrovni po celou dobu měření. Průběžně měřené teploty formy jsou uvedeny v tab. 3.13

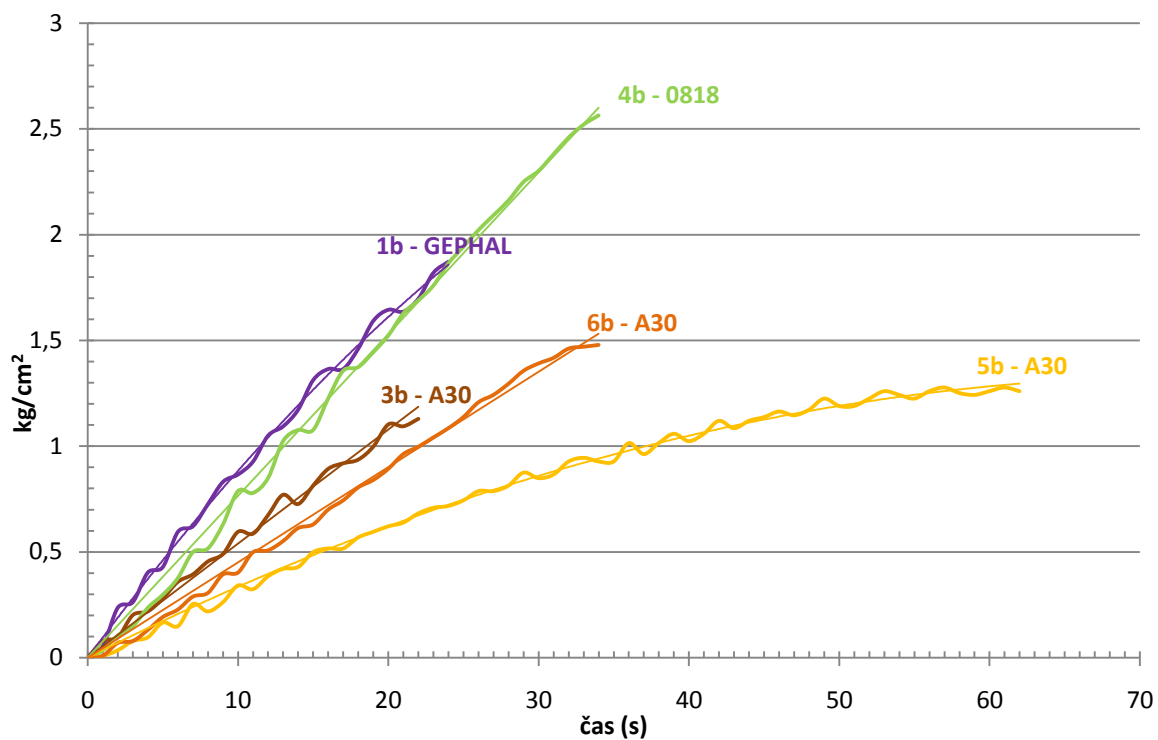
Tab. 3.13 Teploty formy.

č. měření	1b	2b	6b
Teplota formy ($^\circ\text{C}$)	220	230	220

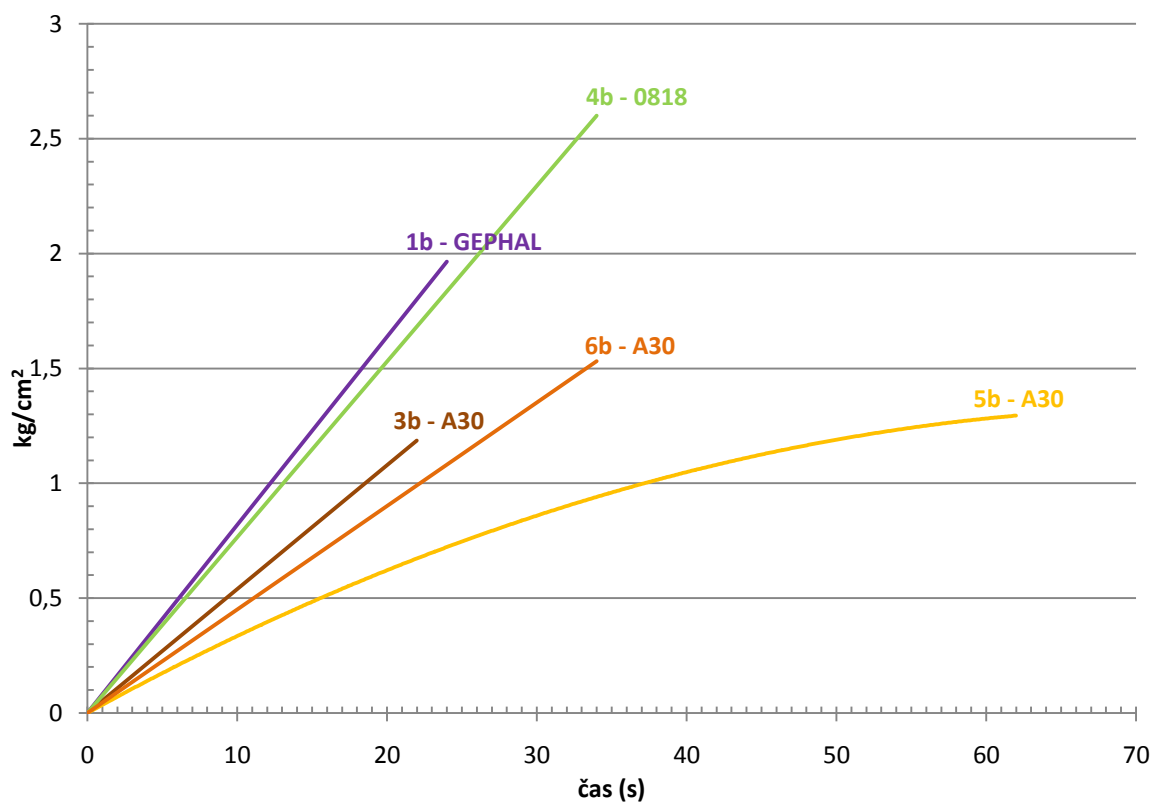
3.4.6 Vyhodnocení

Tab. 3.14 Vyhodnocení zkoušek průtočnosti filtrů se zmenšenou průtočnou plochou.

č.vz.	filtr	teplota kovu	teplota formy	max. prolité množství (kg/cm^2)	doba lití (s)	licí rychlost	spolehlivost R^2
1b	GEPHAL	735°C	220°C	1,873	24	$m_{\text{sec}}=0,081\tau$	$R^2=0,988$
2b	Protečení kovu dělicí rovinou formy						
3b	A30			1,129	22	$m_{\text{sec}}=0,053\tau$	$R^2=0,992$
4b	0818			2,599	36	$m_{\text{sec}}=0,076\tau$	$R^2=0,996$
5b	A30			1,26	62	$m_{\text{sec}}=-1\text{E}^{-4}\tau^2+0,035\tau$	$R^2=0,996$
6b	A30	735°C	220°C	1,479	34	$m_{\text{sec}}=0,045\tau$	$R^2=0,995$



Graf 3.11 Průběhy plnění zachycovacího kelímku proložené spojnicemi trendu.



Graf 3.12 Spojnice trendu průtoku kovu přes zkoušené filtry.

Z grafu 3.12 je zřejmé, že největší průtok taveniny byl filtrem GEPHAL, dále pak lisovaným filtrem 0818 s průměrem otvorů 1,5 mm. Nejnižší rychlost plnění zachycovacího kelímku byla přes pěnové keramické filtry A30. Vzhledem k počtu měření jsou ale výsledky statisticky neprůkazné a je třeba dalšího měření s větším počtem prolitých filtrů.

Z hlediska zanášení filtrů, nedocházelo podle výsledných průběhů, až na filtr 5b, k výraznějšímu snižování průtoku kovu přes filtry ani po zmenšení průtočné plochy filtrů. Navrhoval bych tedy větší zmenšení průtočné plochy. Zanášení filtrů je, ale velmi závislé na čistotě taveniny, je tedy nutné pracovat co možná s největším možným objemem roztaveného kovu, aby byla čistota slitiny pro všechny měření přibližně konstantní.

Jediný filtr, u kterého docházelo k postupnému zanášení a následnému ucpání, je filtr 5b – A30. A to po prolití 5,04 kg taveniny za 62 sekund, což je 1,26 kg/cm². To mohlo být způsobeno zhoršenou kvalitou roztaveného kovu, která se kvůli vícenásobnému přetavování v průběhu zkoušek snižovala.

U těchto zkoušek nebyly počítány odpory filtrů, poněvadž při snížení průtočné plochy došlo k přesunutí řídicího průřezu přímo do filtru a tím by byly výsledky zkreslené.

3.5 Metalografické zkoušky

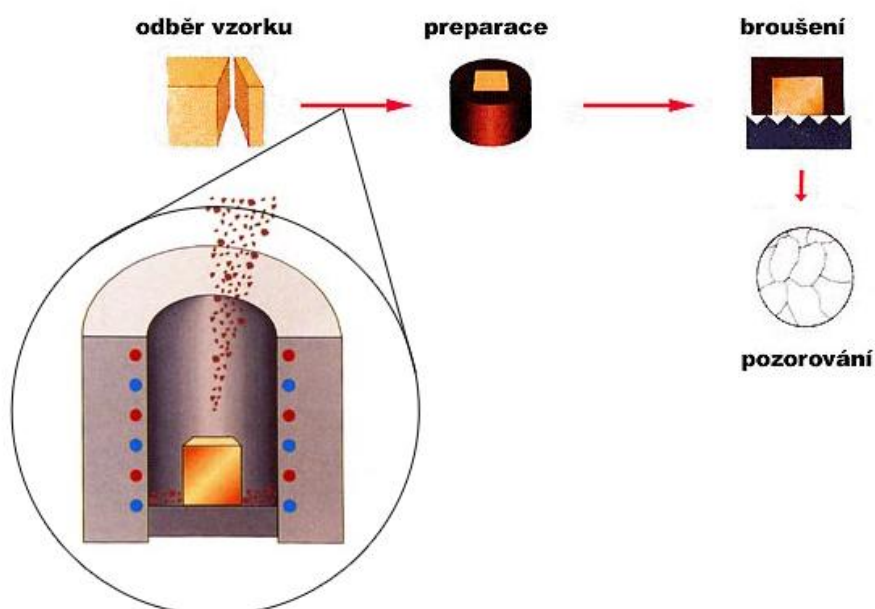
Hlavním cílem metalografie je pozorování hodnoceného vzorku pomocí mikroskopu. Metalografickým vyhodnocením filtrů zalitých v kovu se posuzuje způsob, jakým filtr zachycuje vměšky, množství zachycených inkluzí a jaký typ vměstků je schopen daný filtr zachytit. Podle polohy zachycených vměstků jsme schopni určit, zda docházelo k hloubkové filtraci, nebo pouze k cezení a tvorbě filtračního koláče. Dále můžeme zjistit, jak velké vměšky je schopen tento filtr odstranit. Při vyhodnocení na elektronovém mikroskopu obdržíme přesné chemické složení zachycených inkluzí. Získáme, tak celkový přehled o filtru a jeho vlivu na výslednou čistotu taveniny.

3.5.1 Použitá zařízení

Filtry zalité v kovu byly rozřezány na kotoučové pile. Vzniklé vzorky pak preparovány do speciální umělé hmoty a vybroušeny na brousícím přístroji Pedemin. Pro pozorování byly použity metalografický mikroskop MTM 406 se zvětšením 40x, 100x, 200x, 400x a stereoskopický mikroskop STM 723 s plynulým zvětšením 7x až 45x. Nasnímány byly fotoaparátem olympus E-510 a zpracovány v programu QuickPHOTO Industrial 2.2. Vybrané vzorky byly vyhodnoceny elektronovým mikroskopem (REM) Philips XL 30.

3.5.2 Průběh přípravy vzorků

Při zkouškách průtočnosti filtrů (kap. 3.2 a 3.4) byly z kovové formy (obr. 3.2) po zatuhnutí vyjímány celé vtokové soustavy se zalitými filtry. Označeny byly stejně jako získaná data, tedy 1 až 24 pro první zkoušky prolévání filtrů a 1b až 6b pro zkoušky prolévání filtrů se zmenšenou průtočnou plochou. Postup přípravy vzorků pro pozorování je zobrazen na obr. 3.8. Ze ztuhlých vtokových soustav byly vyřezány zalité filtry, rozříznuty v dělicí rovině formy a upraveny na rozměry vhodné pro brousící zařízení Pedemin, do kterého se vkládají vzorky o průměru 2,5 cm. Postup preparace je následovný: Ve vyhřívané "tlakové nádobě" je vybraný vzorek zasypán práškem ze speciální umělé hmoty. Tato hmota se při současném působení zvýšené teploty a tlaku roztaví a dokonale obklopí studovaný vzorek [25]. Po ztuhnutí tvoří váleček, který byl následně broušen v brusce Pedemin na brusných papírech uvedených v tab. 3.15. Poslední částí přípravy vzorku bylo broušení diamantovou brusnou pastou zrnitosti 1 μm .



Obr. 3.8 Příprava vzorků pro pozorování mikroskopem [25].

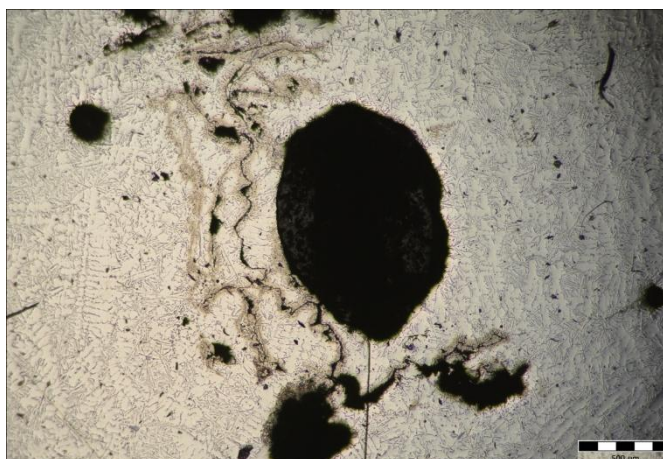
Tab. 3.15 Použité brusné papíry [25].

Evropské značení FEPA	Velikost zrn brusiva [mm]
280	50 - 63
400	32 - 40
800	22 - 32
1 200	10 - 15
2 400	7 - 10
4 000	5

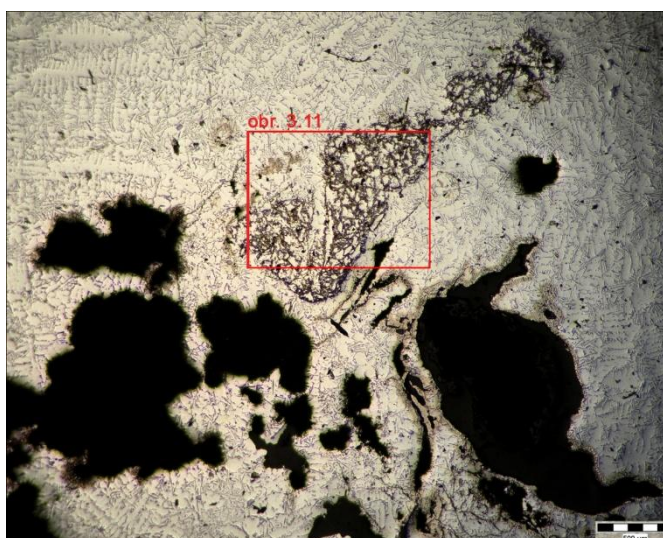
3.5.3 Vyhodnocení

Nejprve byly všechny vzorky pozorovány a nasnímány na stereoskopickém mikroskopu (STM) a metalografickém mikroskopu (MTM). Systematicky byla prohlédnuta celá plocha vzorku a vybraná místa nasnímána a vytvořen zápis o nálezů a jeho poloze. Vyhodnocené snímky u vybraných vzorků byly použity pro snadnější orientaci při pořizování snímků na elektronovém rastrovacím mikroskopu (REM). Zde bylo použito zobrazení BSE (tj. zobrazení, při kterém se detekují odražené elektrony, tyto pak slouží k určení přesného chemického složení daného místa). Do metalografického vyhodnocení této práce byly vybrány pouze některé snímky, které vypovídají o charakteru a množství zachycovaných vměstků daným filtrem. Všechny snímky v této studii jsou orientovány tak, že tok kovu filtrem je zleva doprava.

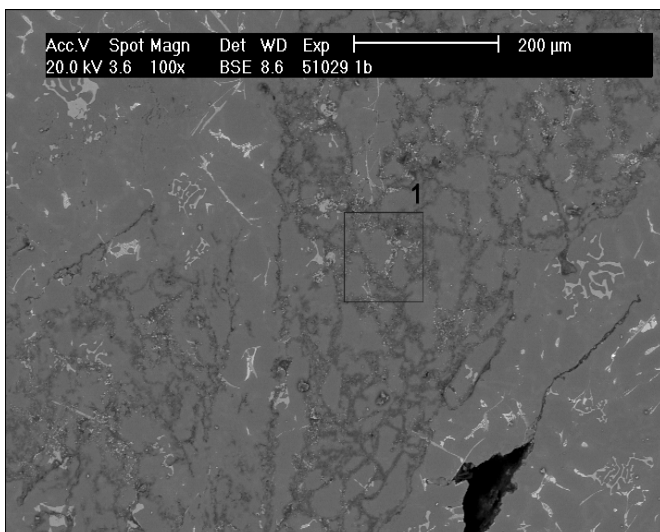
- **1b - GEPHAL**



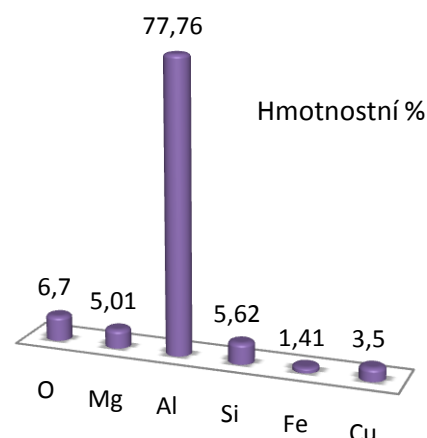
3.9 Oxidická blána na čelní straně filtru.



Obr. 3.10 Rozměrný vměstek zachycený uvnitř filtru.



Obr. 3.11 Detail vměstku (REM).



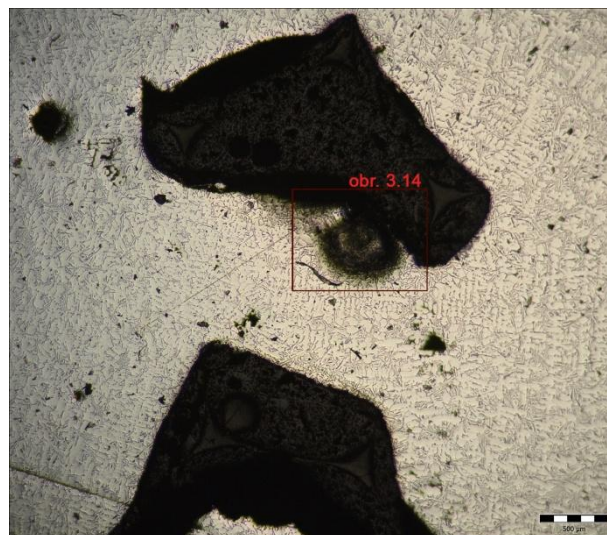
Graf. 3.13 Plošná analýza místa 1.

Plošná analýza vměstku v místě 1 ukázala, že zachycený vměstek bude s největší pravděpodobností spinel $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO}$.

- **3b – A30**

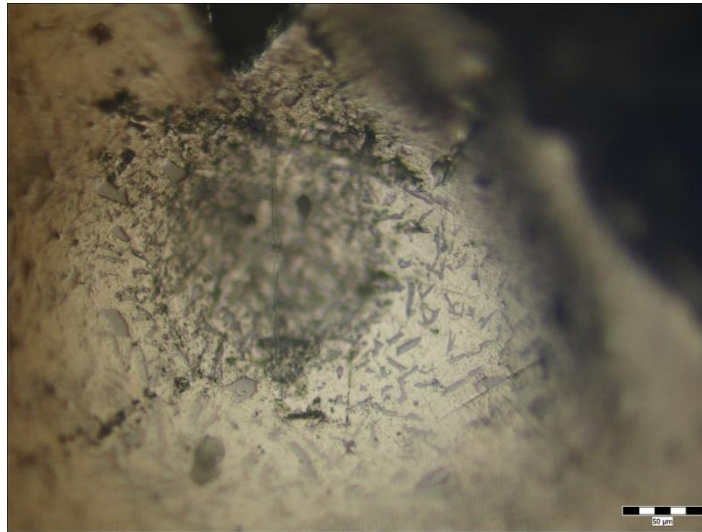


Obr. 3.12 Filtr A30.



Obr. 3.13 Vměstek zachycený uvnitř filtru.

Obr. 3.12 ukazuje přítokovou stranu pěnového keramického filtru A30 se zachycenými vměstky na čele filtru. Na zachycených oxidických blanách vznikají plynové bubliny, projevující se na výbrusu jako porezita. Na Obr. 3.13 je dutina vzniklá pravděpodobně na zachyceném vměstku v objemu filtru.



Obr. 3.14 Detail porozity vzniklé pravděpodobně na zachyceném vmětku.

- **4b – 0818**



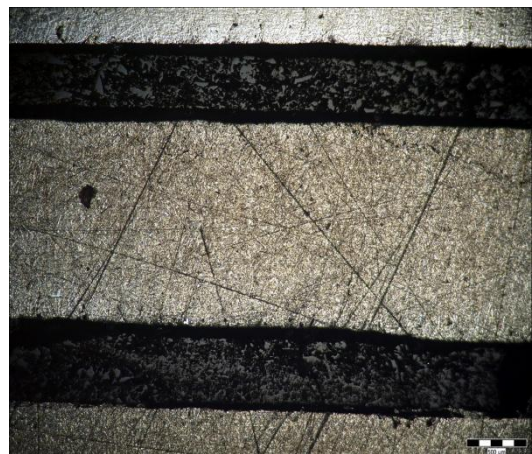
Lisovaný keramický filtr 0818 filtroval cezením, jak je vidět z obr. 3.15. Detail filtračního koláče je zachycen na obr. 3.16, kde tvoří oxidické blány můstek přes kanál filtru.

K mechanismu hloubkové filtrace nedocházelo, jak je vidět z detailu kanálu na obr. 3.17, kde nejsou znatelné žádné zachycené vmětky.

Obr. 3.15 Filtrační koláč vytvořený na čele filtru 0818.

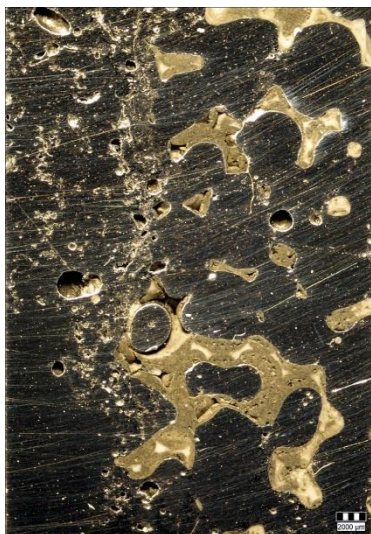


Obr. 3.16 Oxidický můstek.



3.17 Detail kanálu uvnitř filtru.

- 5b – A30

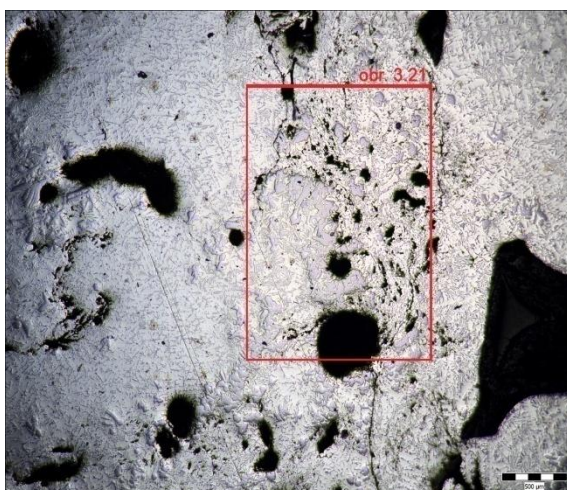


Při prolévání tohoto filtru docházelo k jeho postupnému zanášení vměstkou, až úplnému ucpání. Na obr. 3.18 je výbrus filtru A30. Na čelní straně filtru je vidět rozsáhlý filtrační koláč.

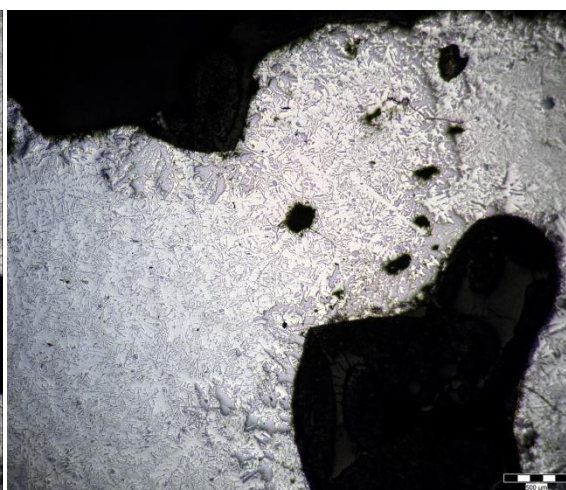
Na detailu čela filtru (Obr. 3.19) jsou vidět oxidické blány spolu se světlými vměstkou, později na elektronovém mikroskopu identifikovanými jako kal.

Obr. 3.20 byl snímán hlouběji uvnitř filtru. I zde jsou znatelné zachycené tzv. „sludge“ neboli kalové fáze.

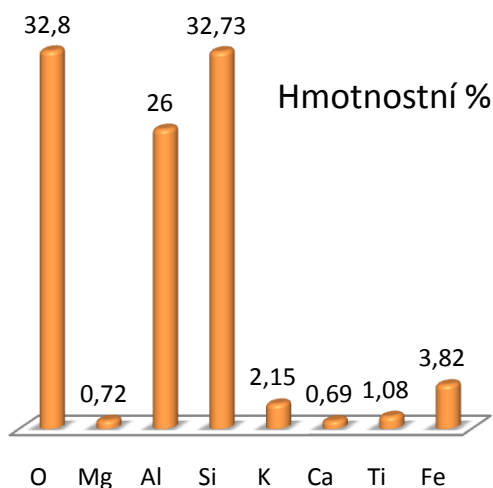
Obr. 3.18 Čelní strana filtru A30 zanesená vměstkou.



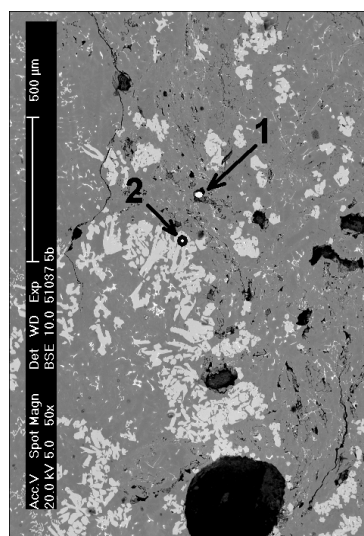
Obr. 3.19 Oxidické blány a kal na čele filtru.



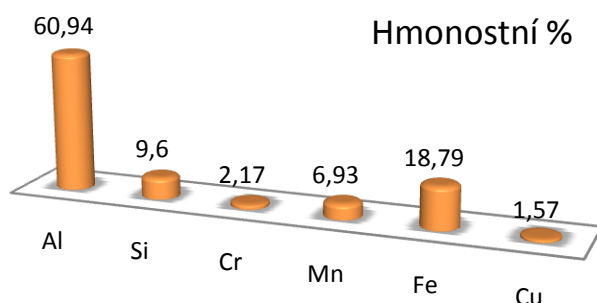
Obr. 3.20 Kalové fáze uvnitř filtru.



Graf. 3.14 Analýza místa 1.



Obr. 3.21 Detail vměstků zachycených na čele filtru.

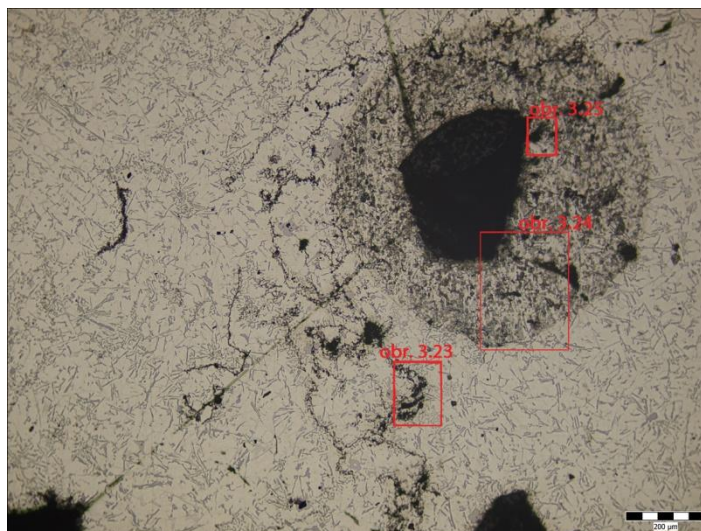


Na obr. 3.21 jsou označeny místa, z kterých byly provedeny analýzy 1 a 2. Podle analýzy 1 v grafu 3.14 bude v tomto místě nejspíš opět spinelový vměstek $Mg.Al_2O_3$.

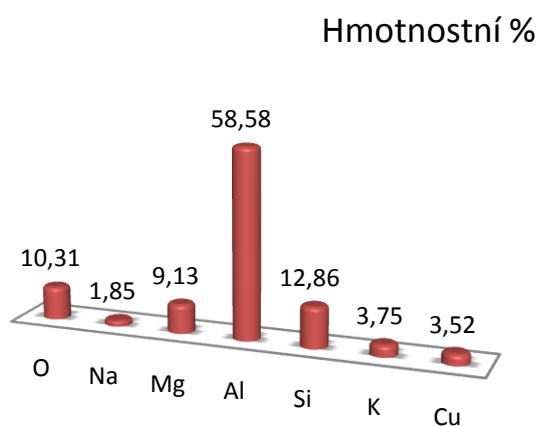
V grafu 3.15 je zobrazena analýza místa 2, ze které je, podle obsahu Cr, Mn a Fe, zřejmé, že světlé vměstky v celém objemu filtru jsou kalové fáze.

Graf. 3.15 Analýza místa 2 z obr. 3.21.

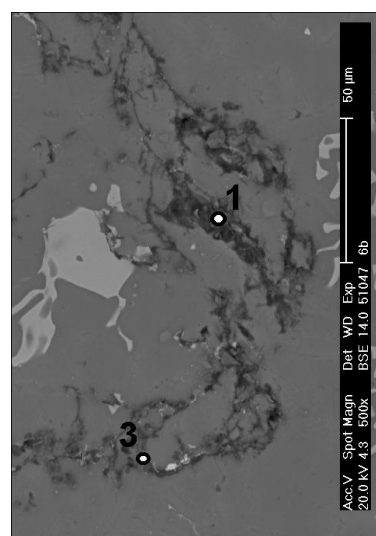
- 6b – A30



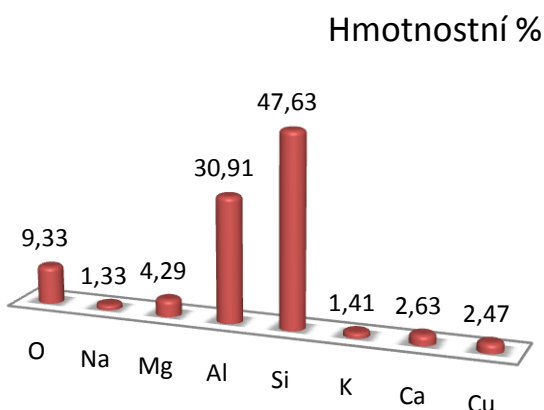
Obr. 3.22 Vměstky zachycené na keramickém pěnovém filtru A30.



Graf. 3.16 Analýza místa 1 z obr. 3.23.



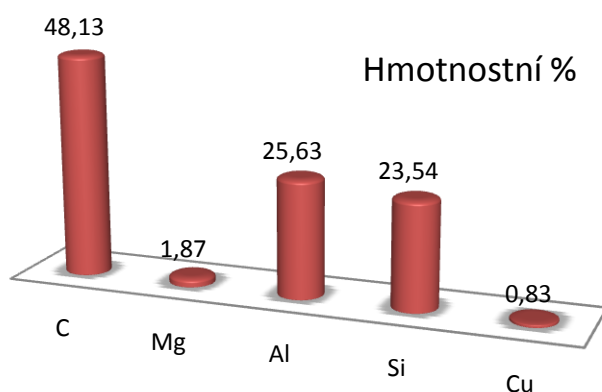
Obr. 3.23 Detail oxidické blány (REM).



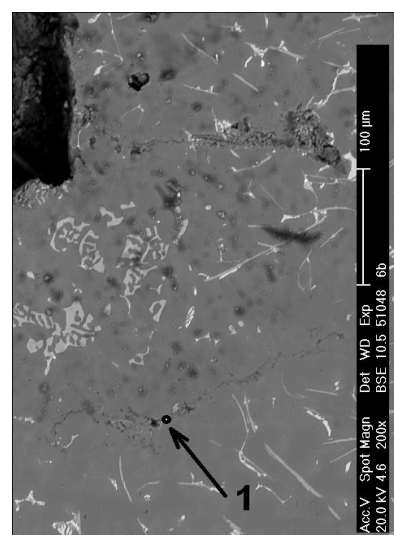
Podle analýzy místa 1 v obr. 3.23, která je vyhodnocena v grafu. 3.16, je tato oxidická blána spinel $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO}$.

V místě 3 by se podle analýzy (graf. 3.17) mohl mimo jiné vyskytovat i exogenní vměstek $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$, který by mohl pocházet například z nátěru kovové formy.

Graf. 3.17 Analýza místa 3 z obr. 3.23.

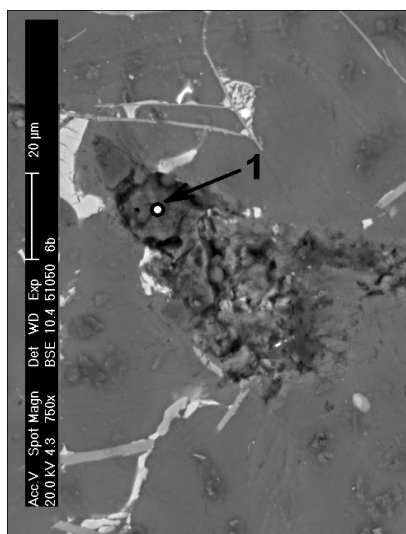


Graf. 3.18 Analýza místa 1 z obr. 3.24.

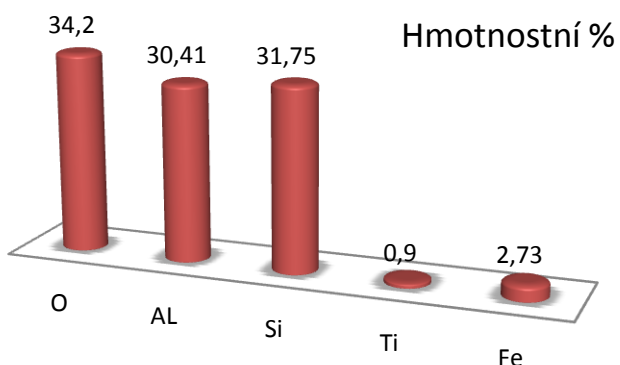


Obr. 3.24 Detail vměstku (REM).

Podle analýzy vměstku v místě 1 na obr. 3.24 pod elektronovým mikroskopem tvoří tento vměstek karbid SiC . Pravděpodobným zdrojem toho vměstku bude tavicí kelímek. Malá částice karbidu křemíku se zachytila na oxidické bláně uvnitř filtru.



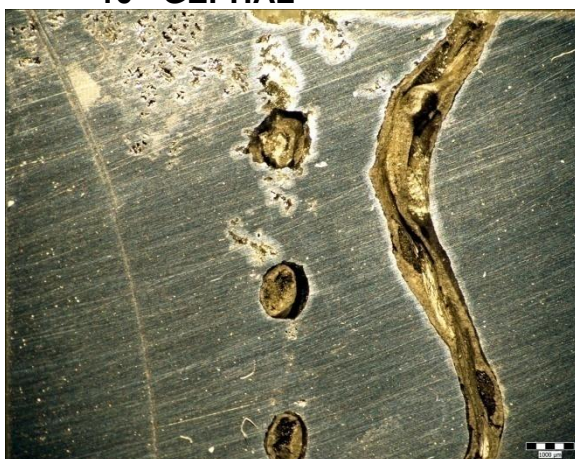
Obr. 3.25 Detail vměstku z obr. 3.22.



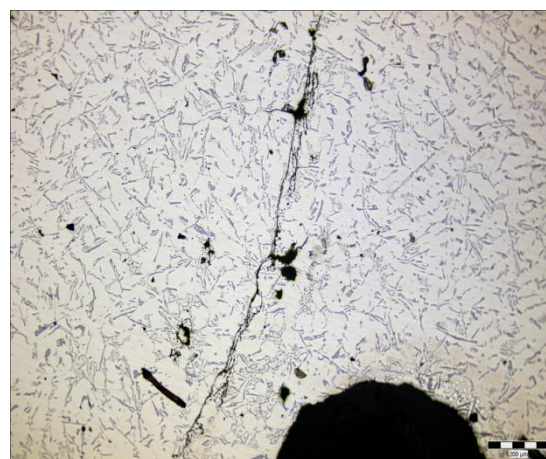
Graf. 3.19 Analýza místa 1 z obr. 3.22.

V analýze vměstku z místa 1 na obr. 3.25 není žádný hořčík, jedná se tedy o oxidický vměstek Al_2O_3 .

- **10 - GEPHAL**

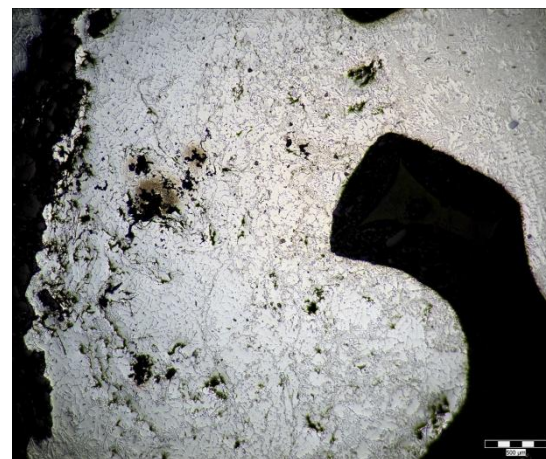
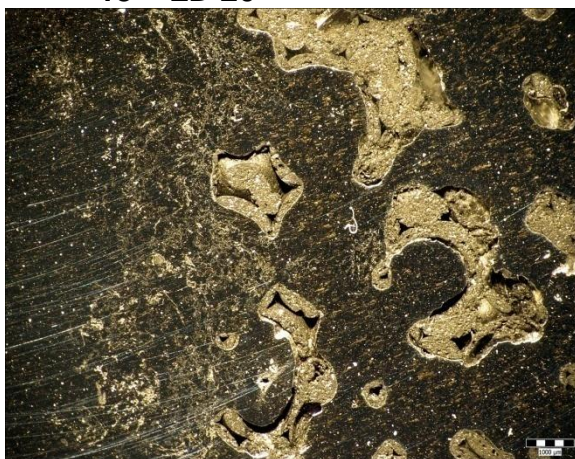


Obr. 3.26 Vlákna filtru s vměstký.



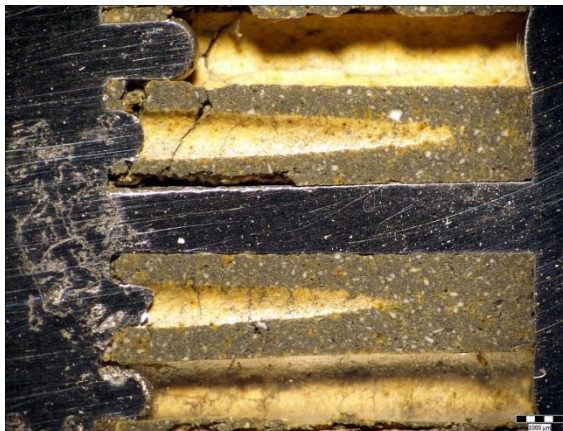
Obr. 3.27 Oxidická blána.

- **13 – LD 20**



Obr. 3.28 Buňky filtru s filtračním koláčem. Obr. 3.29 Čelo filtru zanesené vměstký.

- 17 – 0818

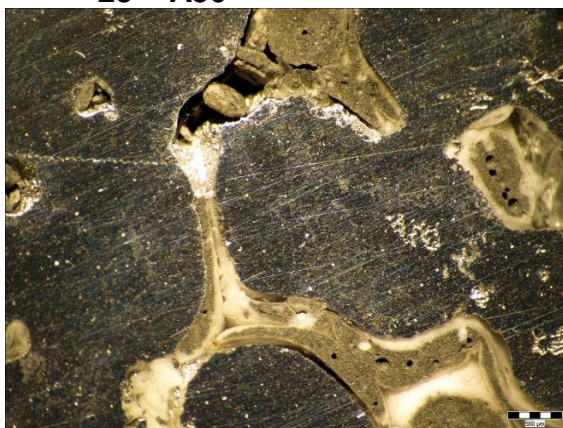


Obr. 3.30 Řez lisovaným filtrem.



Obr. 3.31. Filtrační koláč vytvořený na čele filtru.

- 23 – A30



Obr. 3.30 Pohled do hloubky filtru.



Obr. 3.31 Můstek porezity vzniklé na vměstku.

Můstek viditelný na obr. 3.30 v levé části snímku je v detailu na obr. 3.31 uchycen v buňce filtru.

4 Závěr

Z výsledků prolévacích zkoušek bylo zjištěno, že rychlost plnění formy se u různých typů filtrů mění. Největšího průtoku dosahoval filtr GEPHAL, následovaný lisovanými keramickými filtry a pěnovými keramickými filtry VUKOPOR A. Nejmenší rychlost plnění formy byla zaznamenána přes pěnové keramické filtry VUKOPOR LD, u kterých je navíc do keramiky filtru přidáván grafit. Výsledky však nemusí být statisticky průkazné a je třeba dalších měření s větším počtem zkoušených filtrů.

Při srovnání pěnových keramických filtrů je zřejmé, že filtry VAKUPOR LD mají výrazně menší průtočnost než filtry řady VAKUPOR A se stejnou pórovitostí. Výrobce uvádí u obou typů filtrů stejnou licí rychlost, to však zkoušky nepotvrdily. Snížená rychlost plnění formy přes filtry řady LD může být způsobena řadou faktorů: typem slitiny, podmínkami lití a především jiným materiálem filtru a charakterem zachycovaných vměstků.

Měření průtoku slitiny AlSi12Cu přes filtry VUKOPOR A 30 ukázalo, že po rafinaci taveniny dojde ke zvýšení rychlosti plnění zachycovacího kelímku. Rafinace tedy zvyšuje průtok kovu filtrem.

Největší vliv na dobu plnění formy měly filtry VUKOPOR LD a lisovaný keramický filtr 0818, jejich hydraulické odpory se přibližovaly celkovému odporu vtokové soustavy. Mají tedy ve srovnání s ostatními typy filtrů významné hydraulické odpory z hlediska celkového odporu vtokové soustavy. Hydraulické odpory jsou ale závislé na podmínkách lití a především na licí rychlosti dané výškou lití, tyto výsledky proto nelze zobecnit pro všechny aplikace ve slévárnách a platí pouze pro tento konkrétní případ.

Vliv filtrů na naplynění taveniny nebyl prokázán. Rafinací taveniny se dichte index odlitých vzorků také výrazně nezměnil. Měření však potvrdila, že při jakémkoli transportu taveniny dochází ke zvýšení jejího naplynění.

Studie průběhu zanášení filtrů vměstkou vyžadovala zmenšení průtočné plochy filtrů. Ta byla snížena na 4 cm². Ani po snížení průtočné plochy však u většiny filtrů nedocházelo s daným objemem kovu (přibližně 10kg slitiny AlSi9Cu3) k výraznějšímu zanášení filtrů a průběh průtoku byl stále lineární. Pro další zkoušky doporučuji větší snížení průtočné plochy, nejméně na 2 cm², a měření v ustálených podmínkách lití, tj. velký objem nataveného kovu, aby byla zaručena jeho homogenita a konstantní teplota a ustálená teplota formy.

Metalografické zkoušky vybraných vzorků potvrdily, že u filtrů se sníženým profilem dochází k většímu zanášení vměstkou. U většiny filtrů docházelo k tvorbě filtračního koláče. Hloubková filtrace se uplatňovala pouze u pěnových keramických filtrů. Při analýzách na elektronovém mikroskopu byly zjištěny zachycené vměstky typu: spinel Al₂O₃.2MgO, oxidické blány Al₂O₃, u filtru A 30 také tzv. „sludge“ neboli kalová fáze, exogenní vměstek Al₂O₃.SiO₂.CaO, který by mohl pocházet z nátěru formy a karbid SiC pravděpodobně z tavícího kelímku.

Seznam použitých zdrojů:

- [1] *Slévárenství – teorie* [online]. Vysoká škola chemicko–technologická v Praze [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web:
<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_slevarenstvi/index.htm>
- [2] MICHNA, S. aj. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Prešov: Adin, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [3] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [4] *Specifikace slitin, Chemické označení: EN AB-ALSi9Cu3(Fe)(Zn)* [online]. Trímet Prag s.r.o. [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web:
<http://www.trimet.cz/cz/sv_EN_AB-46500.php>
- [5] ROUČKA, J. *Příručka o filtraci*. 1. vyd. Brno: Česká slévárenská společnost, 2000. 41 s. ISBN 80-02-01389-1.
- [6] MAKAROV, S. Inclusion removal and detectinon. In *Transaction AFS 1999*, s. 727-735.
- [7] FUOCO, R. aj. Characterizations of some types of oxide inclusion in aluminum alloy castings. In *Transaction AFS 1999*, s. 287-294.
- [8] MARTINS, L. and KANNAN, S.: 6 Steps to reducing Inclusion defects. *Modern casting*. March 2003, č.2, s. 39.
- [9] LEV, Přemysl. *Filtrace tavenin pomocí lisovaných keramických filtrů*. Disertační práce v oboru „Metalurgie – Technologie kovů a slitin“. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. 2004. 21 s.
- [10] ANDREWS, I.A. and MATTHEWS A.L.: Molten metal filtration, An Engineered Balance [online]. Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc. [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.foundry.saint-gobain.com/media/documents/S00000000000000001039/Engineered%20Balance.pdf>>
- [11] LÁNÍK, Boris. *Použití pěnových filtrů při odlévání ocelových odlitků*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 64 s.,
- [12] *Profilované filtry pro hliníkové odlitky*. Hüttenes-Albertus CZ.
- [13] *Filtry pro filtraci litiny, hliníku a barevných kovů* [online]. KERAMTECH spol. s r.o. [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web:
<http://www.keramtech.cz/filtry_cz.html>
- [14] *Honeycomb ceramic foundary* [online]. Meijing Environmental Protection Ceramic Ltd. [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web:<http://www.hceramic.com/products/Honeycomb_ceramic_foundary_filters/>

[15] *Ceramic Honeycomb* [online]. iangxi Jintai Special Material Co.,Ltd [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.ceramic-honeycombs.com/en/Product.asp?action=class&big=1>>

[16] *Principy filtrace a druhy filtrů* [online]. Láník - Techservis Boskovice [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.lanik.cz/principyfiltrace.php>>

[17] Metal Pouring/Filtering. *Foundry management and technology*. January 1996, C1-C5

[18] Kalpur [online]. Foseco Česká s.r.o. [cit. 5. března 2008]. Dostupné na Word Wide Web: <www.fosecomet.com/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=13>

[19] ADAMS, A.: Review Iron Gating Design, Filter Use to Optimize Benefits, *Modern casting*. March 2001, č. 3, s. 34-36.

[20] *Pěnové keramické filtry VUKOPOR® A (Technický list)* [online], Láník - Techservis Boskovice [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.lanik.cz/vukopora.php>>

[21] *Pěnové keramické filtry VUKOPOR® LD (Technický list)* [online], Láník - Techservis Boskovice [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web: <<http://www.lanik.cz/vukoporld.php>>

[22] *Keramické licí filtry*. KERAMTECH spol. s r.o. Česko. Duben 2008.

[23] *GEPHAL FILTERS brochure*. HÜTTENES-ALBERTUS France.

[24] BERGEROVÁ, Klára. *Pozřítka v tlakově litých odlitcích ze slitiny hliníku*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2005. 123 s.

[25] *Metalografie I. - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [cit. 28. května 2008]. Dostupné na Word Wide Web: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/index.htm>

Seznam příloh:

Příloha P1 ... Výkres 1. poloviny formy

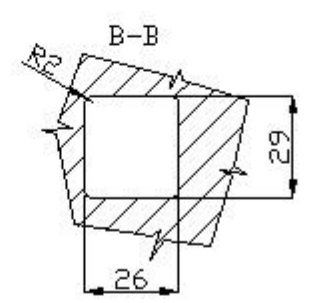
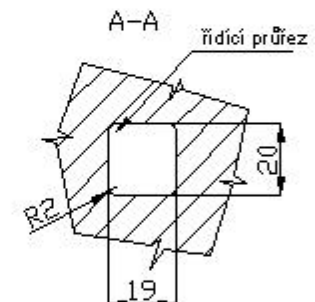
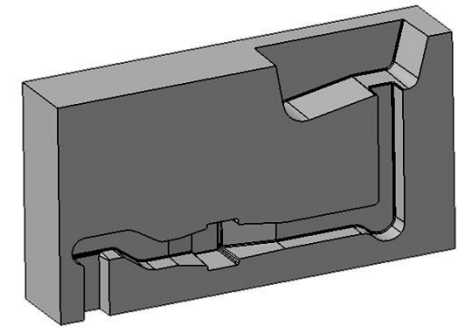
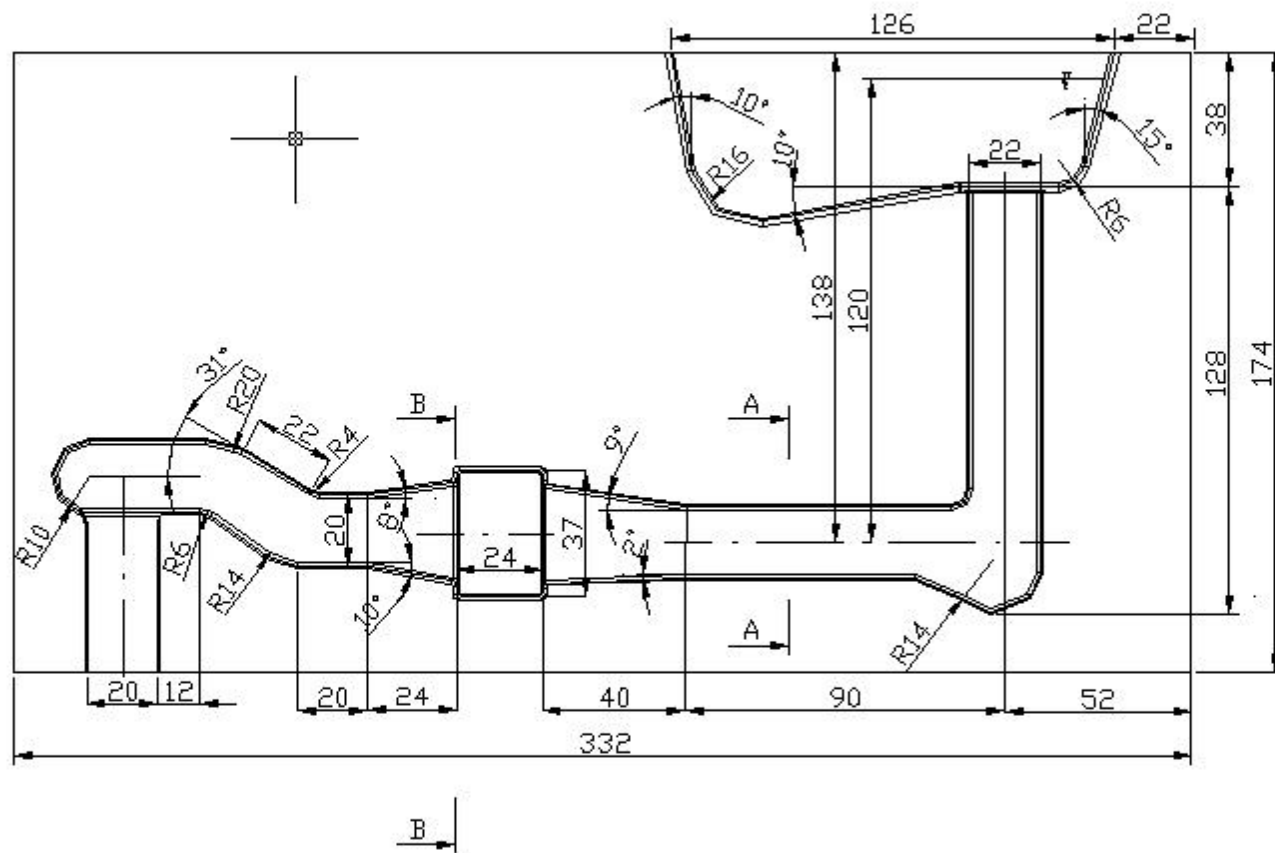
Příloha P2 ... Výkres 2. poloviny formy

Příloha P3 ... Tab. 3.3 Naměřené hodnoty průtoku slitiny AlSi9Cu3

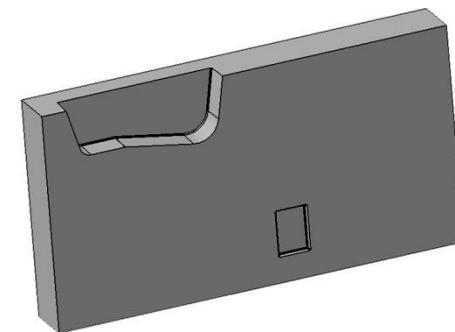
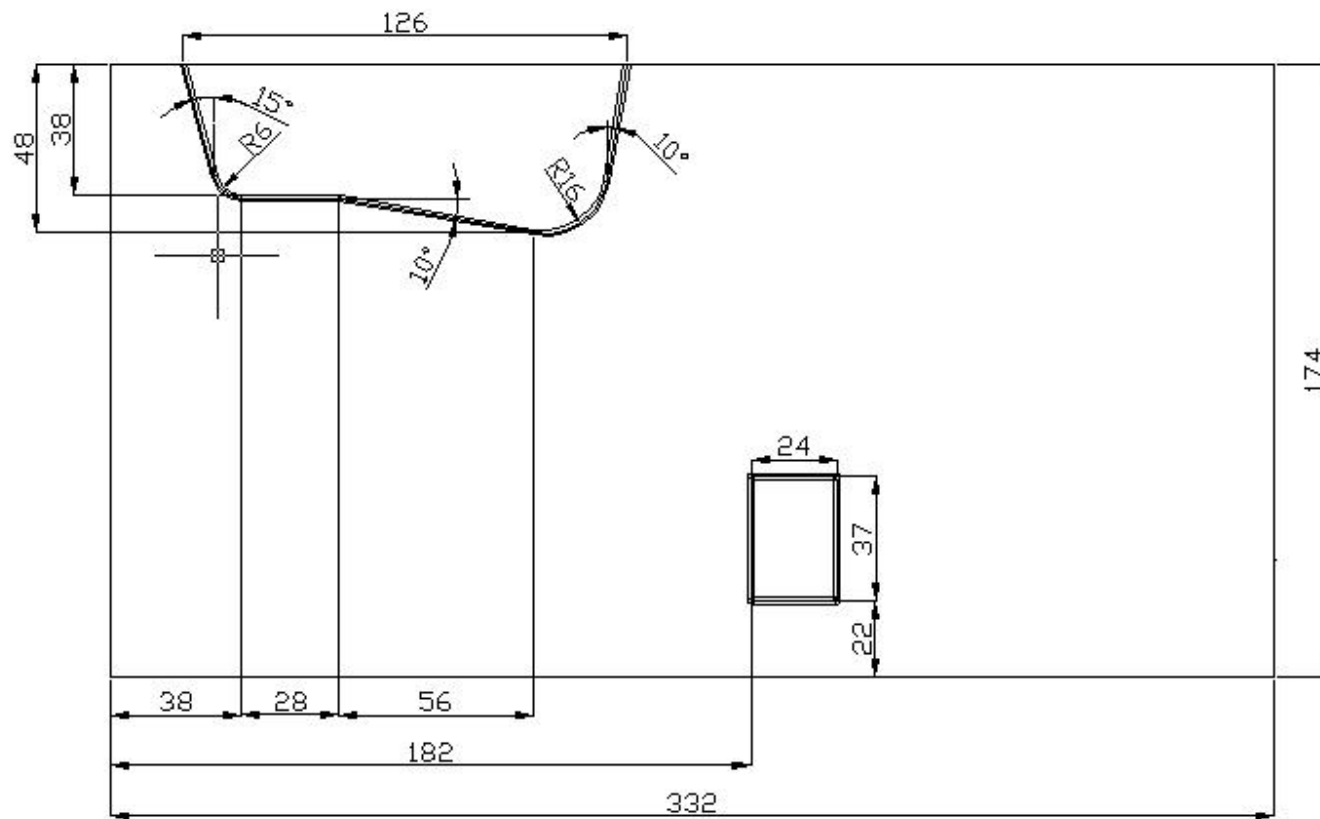
Příloha P4 ... Tab. 3.4 Naměřené hodnoty průtoku slitiny AlSi12Cu

Příloha P5 ... Tab. 3.11 Naměřené hodnoty průtoku taveniny filtry se zmenšenou průtočnou plochou.

Příloha P6 ... Materiálový list – keramická hmota PYROSTAT



Měřítko 1:2



Měřítko 1:2

Tab. 3.3 Naměřené hodnoty průtoku taveniny.

slitina	AlSi9Cu3 (1. pec)								
	14 - bez filtru	10 - gephál	9 - 0733	8 - 0748	17 - 0818	13 - A20	11 - A30	16 - LD20	12 - LD30
čas (s)	kg/cm ²								
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,135	0,037	0,032	0,042	0,032	0,042	0,032	0,009	0,005
2	0,181	0,093	0,060	0,060	0,056	0,074	0,060	0,051	0,046
3	0,260	0,070	0,088	0,093	0,079	0,102	0,093	0,023	0,056
4	0,292	0,162	0,139	0,121	0,084	0,130	0,121	0,097	0,023
5	0,404	0,167	0,167	0,144	0,111	0,162	0,144	0,121	0,065
6	0,478	0,227	0,204	0,162	0,135	0,209	0,181	0,088	0,056
7	0,487	0,251	0,241	0,172	0,144	0,260	0,204	0,190	0,088
8	0,650	0,288	0,279	0,209	0,172	0,269	0,246	0,181	0,093
9	0,673	0,330	0,311	0,241	0,214	0,246	0,269	0,144	0,116
10	0,682	0,353	0,344	0,265	0,241	0,311	0,302	0,251	0,135
11	0,729	0,418	0,376	0,279	0,283	0,357	0,339	0,265	0,135
12		0,422	0,395	0,320	0,320	0,353	0,353	0,232	0,167
13		0,487	0,413	0,362	0,357	0,371	0,376	0,269	0,176
14		0,483	0,446	0,399	0,390	0,436	0,418	0,330	0,186
15		0,548	0,478	0,422	0,413	0,450	0,446	0,316	0,218
16		0,590		0,464	0,460	0,455	0,473	0,316	0,218
17		0,613		0,492	0,483	0,497	0,497	0,381	0,232
18		0,650		0,511	0,520	0,534	0,534	0,381	0,255
19		0,692		0,543	0,525	0,525	0,552	0,362	0,269
20		0,733		0,571	0,590	0,571	0,580	0,371	0,265
21		0,775		0,599	0,673	0,603	0,617	0,413	0,311
22				0,631	0,692	0,590	0,645	0,478	0,316
23				0,668	0,682	0,655	0,664	0,418	0,297
24				0,696	0,789	0,645	0,687	0,520	0,344
25				0,738	0,854	0,678	0,719	0,450	0,376
26				0,771	0,803	0,743	0,757	0,441	0,357
27				0,808	0,896	0,659	0,784	0,501	0,381
28					0,956	0,752	0,798	0,552	0,395
29					0,933	0,696	0,822	0,543	0,432
30					1,012	0,715	0,849	0,497	0,441
31					1,021	0,789	0,863	0,464	0,432
32					1,086	0,701		0,455	0,455
33					1,091	0,817		0,460	0,492
34					1,114	0,752		0,473	0,487
35					1,198	0,789		0,497	0,492
36					1,160	0,836		0,520	0,506
37					1,239	0,771			0,525
38					1,184	0,863			0,562
39					1,253	0,817			0,571
40						0,849			0,590
41						0,873			0,608
42						0,826			0,622
43						0,919			0,622
44						0,845			0,622
45						0,928			0,627
46						0,891			0,627
47						0,910			0,641
48						0,933			0,645
49						0,901			0,673
50						0,975			0,687
51						0,901			0,696
52						0,998			0,724
53						0,919			0,738
54						1,012			0,743
55						0,933			0,743
56						1,021			0,752
57						0,952			0,771
58						1,026			0,789
59						0,970			0,812
60						1,017			0,836

Tab. 3.4 Naměřené hodnoty průtoku taveniny.

slitina	AlSi12Cu (2. pec)			
typ filtru	21 - A30	22 - A30	23 - A30 [R]	24 - A30 [R]
čas (s)	kg/cm ²			
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,014	0,019	0,153	0,060
2	0,070	0,070	0,162	0,111
3	0,056	0,084	0,292	0,176
4	0,149	0,116	0,260	0,232
5	0,088	0,135	0,297	0,237
6	0,181	0,181	0,399	0,260
7	0,227	0,232	0,427	0,311
8	0,172	0,288	0,413	0,367
9	0,265	0,292	0,478	0,404
10	0,311	0,330	0,576	0,432
11	0,269	0,395	0,580	0,473
12	0,320	0,404	0,548	0,515
13	0,422	0,469	0,627	0,580
14	0,371	0,469	0,622	0,641
15	0,418	0,552	0,668	0,659
16	0,473	0,562	0,738	0,673
17	0,478	0,622	0,803	0,733
18	0,501	0,631	0,854	0,831
19	0,566	0,692	0,873	0,836
20	0,617	0,729	0,901	0,840
21	0,645	0,771	0,984	0,928
22	0,655	0,817	1,040	0,984
23	0,659	0,840	1,068	0,989
24	0,668	0,887	1,077	1,072
25	0,715	0,910	1,105	1,082
26	0,798	0,970	1,160	1,133
27	0,845	0,998	1,216	1,188
28	0,863	1,021		1,212
29	0,822			1,286
30	0,831			1,290
31	0,868			1,365
32	0,933			1,388
33	0,979			1,444
34	1,035			1,476
35	1,044			1,504
36	1,026			
37	1,054			
38	1,068			

[R] – tavenina rafinována přípravkem EKOSAL AI 113

Tab. 3.11 Naměřené hodnoty průtoku taveniny filtry se zmenšenou průtočnou plochou.

č. měření - typ filtru	1b - GEPHAL	2b - A30	3b - A30	4b - 0818	5b - A30	6b - A30
čas (s)	kg/cm ²					
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,053	0,079	0,088	0,035	0,009	0,009
2	0,236	0,096	0,096	0,105	0,035	0,070
3	0,263	0,201	0,193	0,149	0,079	0,079
4	0,403	0,219	0,184	0,236	0,096	0,131
5	0,429	0,280	0,254	0,298	0,166	0,193
6	0,595	0,359	0,306	0,376	0,149	0,228
7	0,621	0,394	0,324	0,499	0,254	0,289
8	0,726	0,455	0,385	0,516	0,219	0,306
9	0,831	0,490	0,481	0,630	0,263	0,394
10	0,866	0,595	0,446	0,788	0,341	0,403
11	0,928	0,586	0,490	0,779	0,324	0,499
12	1,050	0,674	0,543	0,849	0,385	0,508
13	1,094	0,770	0,578	1,024	0,420	0,551
14	1,173	0,726	0,569	1,076	0,429	0,613
15	1,313	0,814	0,656	1,076	0,499	0,630
16	1,365	0,893	0,613	1,225	0,516	0,700
17	1,365	0,919	0,726	1,356	0,516	0,744
18	1,461	0,936	0,726	1,374	0,569	0,805
19	1,593	0,998	0,726	1,444	0,595	0,840
20	1,645	1,103	0,875	1,523	0,621	0,893
21	1,636	1,094	0,963	1,628	0,639	0,963
22	1,698	1,129	0,893	1,689	0,683	0,998
23	1,820		1,015	1,759	0,709	1,041
24	1,873		0,971	1,864	0,718	1,085
25			0,928	1,943	0,744	1,138
26			1,024	2,021	0,788	1,208
27				2,091	0,788	1,243
28				2,161	0,814	1,295
29				2,249	0,875	1,356
30				2,301	0,849	1,391
31				2,380	0,866	1,418
32				2,459	0,928	1,461
33				2,520	0,945	1,470
34				2,564	0,928	1,479
35				2,581	0,928	
36				2,599	1,015	
37					0,963	
38					1,015	
39					1,059	
40					1,024	
41					1,059	
42					1,120	
43					1,085	
44					1,120	
45					1,138	
46					1,164	
47					1,146	
48					1,173	
49					1,225	
50					1,190	
51					1,190	
52					1,225	
53					1,260	
54					1,243	
55					1,225	
56					1,260	
57					1,278	
58					1,251	
59					1,243	
60					1,260	
61					1,278	
62					1,260	

Materiálový list – keramická hmota PYROSTAT

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Otevřená (zdánlivá)pórovitost	% obj.	max.30
Hustota	g.cm^{-3}	Min.1,9
Pevnost v ohybu	MPa	Min.25
Součinitel délkové teplotní roztažnost 30-1000°C	10^{-6}K^{-1}	3-6
Měrná tepelná kapacita 30-100°C	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	750-850
Tepelná vodivost 30-100°C	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	1,2-1,7
ΔT	K	min.150
Vnitřní rezistivita 200°C	$\Omega.\text{cm}$	10^7
Vnitřní rezistivita 600°C	$\Omega.\text{cm}$	10^3

Hmota odpovídá ČSN EN 60672-3. Garantovaná teplotní odolnost 1450°C.

Chemické složení	% hmot.
SiO_2	52,3
Al_2O_3	40,9
Fe_2O_3	2,9
TiO_2	1,6
CaO	0,4
MgO	0,4
K_2O	1,1
Na_2O	0,1