

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA VAD TYPU NEKOVOVÝCH VMĚSTKŮ V ODLITCÍCH HLAV MOTORŮ A NÁVRH METOD JEJICH ODSTRANĚNÍ

ANALYSIS OF NON-METALIC INCLUSIONS IN MOTOR HEADS CASTINGS AND SUGGESTION ON THEIR REMOVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Dratnal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Lukáš Dratnal**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

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

Analýza vad typu nekovových vměstků v odlitcích hlav motorů a návrh metod jejich odstranění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je analyzovat příčiny vzniku a typ vměstků, které jsou zjišťovány při odlévání odlitků hlav motorů z hliníkových slitin. Předpokládá se návrh řešení, vedoucí k zamezení vzniku těchto vad.

Cíle diplomové práce:

Návrh řešení na snížení obsahu vměstků v odlitcích hlav válců.

Seznam literatury:

Campbell, L. (1991): Castings. Oxford, Butterworth-Heinemann, ISBN 0 7506 1072.

Fuoco, R. (1999): Characterization of Some Types of Oxide Inclusion in Aluminium Alloy Casting. AFS Transaction AFS.

Gruzleski, J.E. (1999): The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys. Des Plaines, AFS, ISBN 0-87433-121-8.

Warmuzek, M. (2004): Aluminium-Silicon Casting Alloys on Atlas of Microfractographs, Materials Park, OH: ASTM International, ASBN 9781615030750.

Krone, K. (2000): Aluminiumrecycling. Vereinigung deutscher Schmelzhütten, Düsseldorf, ISBN 3-0-003839-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Zlepšování kvality kovu pro sériovou výrobu odlitků automobilového průmyslu vede ke zkvalitňování vlastností odlitků a k jejich nižším výrobním nákladům. Tato práce se zabývá analýzou nekovových vměstků obsažených v odlitcích hlav spalovacích motorů, odlévaných ve společnosti Nematik Czech Republic, s.r.o. Řešení problematiky obsahuje rozbor velikostí, tvarů, chemického složení a tvrdostí konkrétních nekovových vměstků. Dále se práce zabývá popisem čistoty kovu v udržovacích pecích a návrhem na odstranění vměstků z kovu.

Klíčová slova

Nekovový vměstek, siluminy, hliníkový ingot, PoDFA, Prefil, LAIS, LiMCA, K-mold, Drosstest, Straube-Pfeiffer test, Ultrasonic Technique, Vmet, skenovací elektronový mikroskop, filtrace, udržovací pec.

ABSTRACT

Improving the quality of metal castings for serial production of automotive industry, leading to improvements in the properties of casts and their lower costs. This publication analyzes the non-metallic inclusions contained in casts of heads of internal combustion engines, molded of Nematik Czech Republic, Ltd. Tackling includes analysis of size, shape, chemical composition and hardness of the specific non-metallic inclusions. The thesis describes the purity metal holding furnaces and proposals to eliminate inclusions from metal.

Key words

Non-metallic inclusion, silumin, casting pig, PoDFA, Prefil, LAIS, LiMCA, K-mold, Drosstest, Straube-Pfeiffer test, Ultrasonic Technique, Vmet, scanning electron microscope, filtration, holding furnace.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRATNAL, L. *Analýza vad typu nekovových vměstků v odlitcích hlav motorů a návrh metod jejich odstranění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Analýza vad typu nekovových vměstků v odlitcích hlav motorů a návrh metod jejich odstranění vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 20.5. 2016

.....
Bc. Lukáš Dratnal

PODĚKOVÁNÍ

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

Poděkování patří také společnosti Nematik Czech Republic, s.r.o., Ing. Martinovi Hawelkovi a kolektivu procesních inženýrů společnosti Nematik Czech Republic, s.r.o. za technickou podporu a cenné konzultace.

Významné poděkování patří i celé mé rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost během studia.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Obsah	6
1 Úvod	8
2 Teoretická část.....	9
2.1 Slitiny na bázi Al-Si	9
2.1.1 Slitiny Al-Si-Mg.....	10
2.1.2 Slitiny Al-Si-Cu.....	10
2.2 Tavení slitin hliníku.....	10
2.3 Rafinace taveniny	11
2.3.1 Rafinační soli.....	12
2.3.2 Filtrace.....	12
2.3.3 Rafinace odplyňováním.....	14
2.4 Metody pro detekci vměstků v hliníkové slitině	15
2.4.1 Metoda PoDFA	15
2.4.2 Metoda Prefil.....	16
2.4.3 Metoda LAIS.....	17
2.4.4 Metoda LiMCA	18
2.4.5 K-mold	19
2.4.6 Drosstest a Straube-Pfeifferův test.....	21
2.4.7 Ultrasonic Technique	21
2.4.8 Vmet.	22
3 Praktická část.....	24
3.1 Cíle	24
3.2 Představení firmy	24
3.3 Odlévaná slitina	24
3.4 Popis výrobního procesu	25
3.5 Analýza vměstků	31
3.5.1 Výskyt vměstků.....	31
3.5.2 Analýza tvrdosti vměstků.....	33

3.5.3	Velikost a tvar vměstků - SEM	36
3.5.4	Velikost a tvar vměstků – světelný mikroskop	39
3.5.5	Analýza chemického složení vměstků - SEM.....	45
3.5.6	Čistota taveniny v udržovacích pecích – K-mold	50
3.5.7	Čistota taveniny v udržovacích pecích – metoda Vmet	56
3.6	Návrhy na odstranění vměstků	60
3.6.1	Filtrace kovu.....	61
3.6.2	Zlepšení přípravy kovu.....	63
4	ZÁVĚR.....	64
	Seznam použitých zdrojů.....	65
	Seznam použitých zkratk a symbolů	67
	Seznam obrázků.....	68
	Seznam tabulek.....	69
	Seznam příloh.....	70

1 ÚVOD

Hliníkové slitiny jsou velkou skupinou kovových slitin, které mají díky svým charakteristickým vlastnostem široké využití. V porovnání k ocelím a litinám je hlavní výhodou hliníku a jeho slitin relativně nízká hustota, přibližně $2,7 \text{ g/cm}^3$. Jedním z největších odběratelů hliníkových slitin je automobilový průmysl, který usiluje o snižování spotřeb pohonných hmot, což vede ke snížení emisí. Se zpřísňujícími se ekologickými požadavky se přistupuje k odlehčování pohonných agregátů a konstrukcí automobilů. Mnoho litinových odlitků osobních i nákladních aut bylo nahrazeno hliníkovými slitinami. Typickými odlitky z hliníkových slitin pro automobil jsou bloky motorů, převodové skříně, hlavy válců, písty a v neposlední řadě litá kola. Hlava válců je tvarově velmi složitý odlitek. Trendem je snižování zdvihových objemů motorů a zvyšování výkonů. Hliníkové hlavy díky zvyšování teplot a tlaků při spalování musí odolávat extrémním podmínkám. Se stoupajícími teplotami a tlaky při spalování je nutné neustále zvyšovat kvalitu materiálů hlav spalovacích motorů. Pro zvýšení kvality materiálů je nutné neustále zdokonalovat průběh výrobního procesu a dodržovat postupy pro zajištění požadované kvality. Nekovové vměstky jsou v praxi častým problémem hliníkových slitin. Hliník má vysokou afinitu ke kyslíku a tvoří velmi ochotně s kyslíkem oxidy. Tvorbu oxidů významně ovlivňuje víření taveniny, ke kterému dochází v jednotlivých fázích přípravy taveniny a při samotném odlévání do formy. Zoxidované vrstvy mohou v odlitku tvořit nebezpečné oxidické blány, které mohou výrazně snížit mechanické vlastnosti a těsnost odlitku. V siluminech obsahujících hořčík se ochotně tvoří i oxidy hořčíku a spolu s oxidy hliníku tvoří tzv. spinely. Zabránění vzniku nekovových vměstků ve slitinách hliníku je velmi náročné, a proto je boj proti vadám typu nekovových vměstků zaměřen na jejich odstranění rafinací. Vměstky obecně mohou působit negativně na mechanické vlastnosti odlitků, na jejich těsnost a v některých případech mají i negativní vliv na obráběcí nástroje.

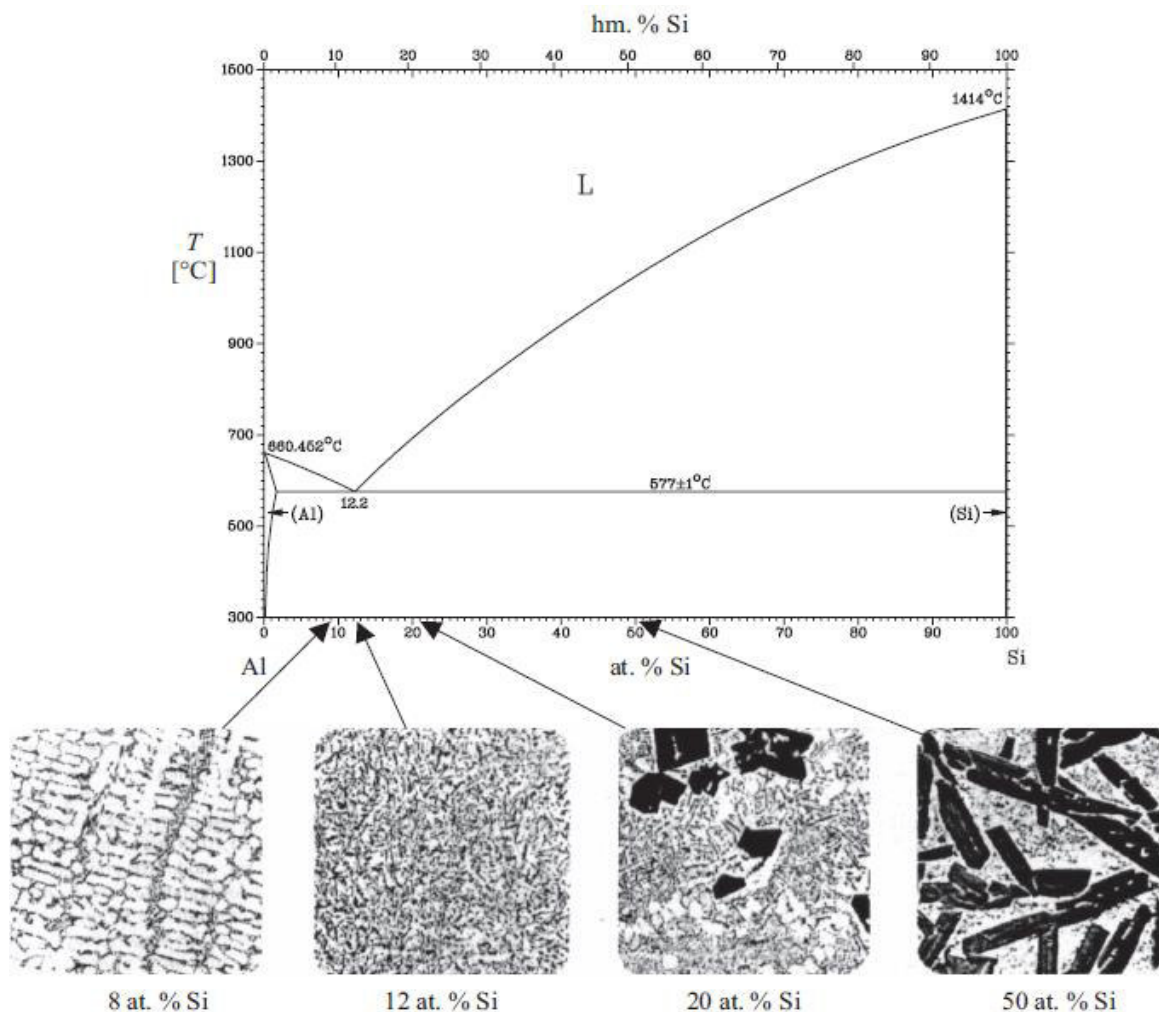
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Slitiny na bázi Al-Si

Slitiny Al-Si neboli siluminy jsou nejvíce používanou skupinou hliníkových slitin. Důvodem jsou dobré slévárenské vlastnosti, zejména zabíhavost.

Křemík má v hliníku maximální rozpustnost pouze 1,65 %, a to při eutektické teplotě 577 °C. S klesající teplotou rozpustnost klesá. Ve slévárenské praxi mají slitiny vždy více % Si, a proto mají ve struktuře vyloučené eutektikum $\alpha(\text{Al})$ -Si. Na obr. 1 je uveden rovnovážný diagram Al-Si. Slitiny Al-Si se dělí na podeutektické, eutektické a nadeutektické. [1]

Struktura podeutektických siluminů se skládá z primárních dendritů $\alpha(\text{Al})$ a eutektika. Obsah Si se pohybuje od 5 do 11 %. Eutektické siluminy obsahují kolem 12 % Si a struktura je tvořena eutektikem. Nadeutektické siluminy obsahují částice primárního křemíku, které vnášejí do slitiny křehkost a tvrdost. Čím pomalejší je tuhnutí, tím hrubší částice Si se v siluminech vylučují. Se stoupajícím obsahem Si ve slitině se zlepšují slévárenské vlastnosti. [1]



Obr. 1: Rovnovážný diagram Al-Si [2]

2.1.1 Slitiny Al-Si-Mg

Hořčík je ve slitinách Al-Si velmi užitečným prvkem, obzvláště jeho schopnost vytvrzování slitiny za tepla. Množství Mg ve slitině bývá několik desetin procenta. Čím více je hořčíku, tím lepšího vytvrzení lze dosáhnout. Zvyšování pevnosti a tvrdosti ovšem vždy vede ke snížení tažnosti slitiny. [1]

Slitiny Al-Si-Mg jsou slitinami podeutektickými a se stoupajícím obsahem Si se zlepšují slévárenské vlastnosti.

2.1.2 Slitiny Al-Si-Cu

Tento typ slitin je nejrozšířenější pro odlitky v automobilovém průmyslu. Používají se slitiny podeutektické až eutektické. Obsah mědi ve slitině bývá do 5 %. Přídavek mědi dodává slitině velmi dobré mechanické vlastnosti a dobrou obrobiteľnosť. Měď dále snižuje odolnost proti korozi. Vlivem mědi dochází k samovolnému vytvrzování bez tepelného zpracování. Čím rychlejší je ochlazování po odlití, tím více přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$ vzniká a tím vyššího vytvrzení lze dosáhnout. Vytvrzení trvá při pokojových teplotách v řádu několika dnů. [1]

Měď ve slitinách Al-Si snižuje stahování kovu při tuhnutí a zvyšuje těsnost odlitků. Vlivem vytvrzení slitiny dochází k nárůstu pevnosti a tvrdosti, ale k poklesu tažnosti. Většina odlitků se po odlití obrábí a měď způsobuje lámavou třísku a je docíleno kvalitního povrchu. [1]

2.2 Tavení slitin hliníku

V běžných slévárenských provozech se jako vsázka do tavicích pecí používá hliníkových housek. Hliníkové housky se vyrábí buď prvovýrobou pomocí elektrolýzy, a nebo druhovýrobou přetavováním hliníkových odpadů. Prvovýroba je energeticky velmi náročná a velmi drahá. Spotřeba energie je přibližně 13,3 kWh/kg hliníku. Většina sléváren neželezných kovů tedy odebírá ingoty druhého tavení (obr. 2). Ingoty mají tedy předem známé složení a po roztavení se provádí jen mírné dolegování, případně očkování či modifikace. [2]



Obr. 2: Ingoty hliníkové slitiny AlSi7MgCu0,5 firmy Slovalco [zdroj: vlastní]

Hliník a hliníkové slitiny mají velký sklon ke vzniku nekovových vměstků a k rozpouštění vodíku v tavenině, zvláště za vyšších teplot. Nekovové vměstky jsou nečistoty, které se objevují v objemu kovu odlitku. Tyto částice narušují homogenitu a

souvislost kovové matrice. Vměstky zhoršují mechanické vlastnosti, těsnost, slévárenské vlastnosti, obrobiteľnosť a ďalší. Dle tvaru částic lze vměstky dělit na:

- Oxidické blány
- Makroskopické vměstky kompaktní
- Mikroskopické částice

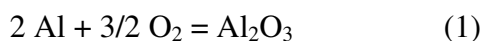
Ve slévárenství se požadavky na čistotu taveniny odvíjí od typu odlitku a jeho náročnosti použití. Čím menší jsou průřezy stěn odlitku, tím více vměstky ovlivňují mechanické vlastnosti a těsnost. [1]

Vznik vměstků

Vměstky se dle původu dělí na:

- Exogenní – do taveniny se dostávají zvenčí během tavení, transportu, udržování či odlévání. Bývají to částice žáruvzdorných materiálů z vyzdívek pecí či kelímků.
- Endogenní – vznikají oxidací hliníku a dalších přítomných prvků. Jedná se o chemické reakce mezi jednotlivými prvky v tavenině. Mohou tvořit filmy, kompaktní částice nebo shluky. [1]

Nejčastěji dochází k oxidaci hliníku dle rovnice:



2.3 Rafinace taveniny

Rafinace je proces, při kterém se snižuje obsah vměstků v tavenině. Rafinační postupy se provádějí zejména v pánvi, v udržovací peci nebo při samotném lití. [1]

Nejprimitivnějším způsobem rafinace je ponechání taveniny v klidu v peci či v pánvi. Tomuto procesu se říká odstátí taveniny. Principem této metody je ponechání taveniny v klidu po určitý čas, za který mají vměstky možnost vyplouvat na hladinu. Princip je tedy založený na rozdílu hustot vměstků a taveniny. Vměstky, které mají nižší hustotu než hliníková tavenina, mohou vyplouvat směrem k hladině. Vměstky, které mají vyšší hustotu než tavenina, se naopak usazují na dně nádoby. Dále jsou v tavenině přítomny vměstky, které mají hustotu podobnou hustotě taveniny, a tedy nepodléhají žádnému většímu pohybu. Kromě hustoty, má na vyplouvání nečistot vliv i poměr povrchu a objemu vměstku. Pokud je vměstek tenký a plošný, je i při velkém rozdílu hustot kladen mechanický odpor taveniny vůči vměstku. Vyplouvání či sedimentace jsou operace časově náročné a rafinace pak může zdržovat tavení, udržování či lití kovu. Dále pokud je proces prováděn v pánvi, tak dochází k ochlazení taveniny bez možnosti příhřevu. Vzhledem k sériové výrobě a nepřetržitému provozu není tato metoda vhodně použitelná, ale doporučuje se odstátí po každém přelití kovu zařadit.

Rychlost vyplouvání či sedimentování vměstků je možné popsat Stokesovým zákonem:

$$v = \frac{2}{9} * r^2 * g * \frac{(\rho_K - \rho_V)}{\eta} \quad (2)$$

kde:

hodnota v je rychlost [m/s]

hodnota r je poloměr částice [m]

hodnota g je tíhové zrychlení [m/s^2]

hodnota ρ_K je hustota kovu [kg/m^3]

hodnota ρ_V je hustota částice [kg/m^3]

hodnota η je kinematická viskozita [m^2/s].

2.3.1 Rafinační soli

Účelem rafinačních solí je vázání nečistot, snížení ztrát hliníku nebo snížení obsahu některých prvků. Soli jsou na bázi chloridů a fluoridů s dalšími přísadami. Některé soli jsou určeny pouze na hladinu taveniny a mají za úkol krýt taveninu od přístupu atmosféry. Potlačují tedy oxidaci či naplynění. [1]

Sůl se do taveniny může přidat manuálně pomocí ponorného zvonu a následně co nejlépe rozmíchat. Po přidání soli dochází ke změně povrchového napětí mezi kovem, oxidy a vměstkami, které jsou poté vynášeny k hladině. Po reakční době hladinu očistíme od stěrů. Dalším způsobem je sůl aplikovat do taveniny injektáží. S výhodou se používá vnášení rafinační soli speciálním zařízením, které je součástí odplyňovacího zařízení FDU od společnosti Foseco.

2.3.2 Filtrace

Odstraňování nečistot typu nekovových vměstků, strusky, ostřiva formovacích a jádrových směsí, oxidických blan a dalších, lze provádět filtrací taveniny. Filtr jako takový, umožňuje kromě samotné filtrace i zklidnění plnění, zjednodušení vtokové soustavy a několik dalších faktorů.

Filtrace je způsob čištění taveniny, při kterém se používají tkaninové filtry, kovová síťka, keramické či pěnokeramické filtry. Filtrace lze provádět při přelévání do transportních pánví, v udržovacích pecích či při plnění dutiny formy. [1]

Při použití různých typů filtrů se uplatňují různé druhy filtračních mechanismů. Tyto mechanismy závisí na druhu slitiny, lici teplotě a rychlosti lití. [17]

Filtrace cezením

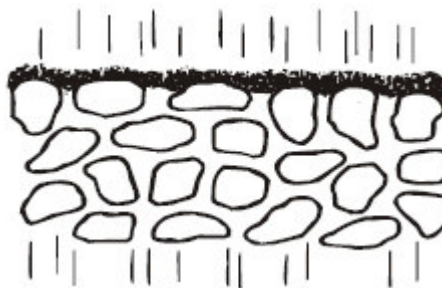
Při filtraci jsou zachycovány pouze vměstky, které jsou větší než velikosti otvorů filtru na čelní přítokové straně. Lze zachytit jen velké vměstky a oxidické blány. Obr. 3 vystihuje princip filtrace cezením. [17]



Obr. 3: Princip filtrace cezením [17]

Tvoření filtračního koláče

Tento mechanismus následuje po zachycení prvních vměstků na čele filtru. Tyto větší částice působí adhezně jako překážky pro další jemnější částice. Vrstva nečistot se při průtoku kovu zvětšuje, dokud se filtr neucpe a proudění kovu je ukončeno. Tento princip umožňuje zachytit i velmi jemné částice. Účinnost filtru je dána velikostí ok a dále poměrem plochy ok na plochu filtru. [17]



Obr. 4: Filtrační koláč [17]

Hlubková filtrace

Tato filtrace probíhá v celém objemu filtru. V průběhu proudění znečištěné taveniny dochází k nalepování vměstků na stěnách keramiky. Vměstky tvoří v pórech filtru tzv. mosty. Tento princip filtrace umožňuje zachycení i jemných částic v řádu jednotek mikrometrů. Filtr se postupně ucpává, až se stane neprůtočný. Průtočnost filtru je dána obsahem vměstků v kovu, velikostí pórů ve filtru a také materiálem filtru, který rozhoduje o adhezních silách mezi vměstky a filtrem. Nejvyšší účinnost hloubkové filtrace mají pěnové keramické filtry. Ploché filtry nejsou schopné hloubkové filtrace a filtry s přímými otvory fungují spíše na principu filtračního koláče. [17]

Pěnokeramické filtry

Struktura filtru vypadá jako síť vzájemně propojených buněk ve tvaru pentaedru. Filtry se vyrábí povlakováním polyuretanové pěnové matrice keramickou suspenzí. Keramická suspenze se volí dle použití filtru. Vlivem složitosti struktury filtrů, dochází uvnitř ke změnám směrů proudění a k místním vírům. Toto složité proudění má za následek častý styk vměstků s materiálem filtru a jejich zachytávání.



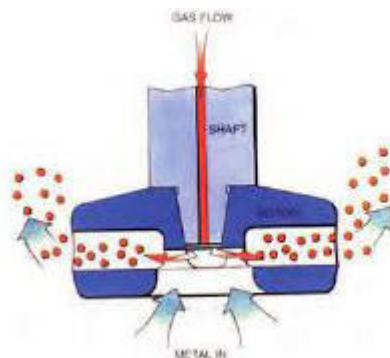
Obr. 5: Víření taveniny ve struktuře filtru [17]

2.3.3 Rafinace odplyňováním

Rotorové odplyňovací zařízení, které je dnes velmi používané, je vhodné pro úpravu taveniny. Díky správně použitému druhu a tvaru rotorové hlavy, použitím optimálních otáček a vhodné hloubce zanoření rotoru lze vzhledem k velikosti kelímku dosáhnout velmi dobrého odplynění a zároveň snižovat obsah nečistot.

Rotor zařízení je grafitový, dutý a proudí skrz něj inertní plyn. Nejčastěji se používá dusík. Na rotoru je nasazená grafitová hlava, která je různě tvarovaná a umožňuje uvádění taveniny do pohybu. Dále hlava roznáší jemné bublinky do objemu taveniny, což umožní difuzi vodíku do bublin. Bubliny vyplouvají vzhůru k hladině a unášejí sebou i některé typy vměstků. [1]

Zařízení FDU od firmy Foseco je možné vybavit i zařízením MTS s přidáváním rafinační soli do taveniny. Tím je možné kromě dobrého odplynění snížit i obsah nečistot. Tím lze dosáhnout lepší kvality kovu, lepší zabíhavosti a lepších mechanických vlastností. Na obr. 6 je vyobrazen princip rotoru FDU. [18]



Obr. 6: Princip rotoru FDU [19]

2.4 Metody pro detekci vměstků v hliníkové slitině

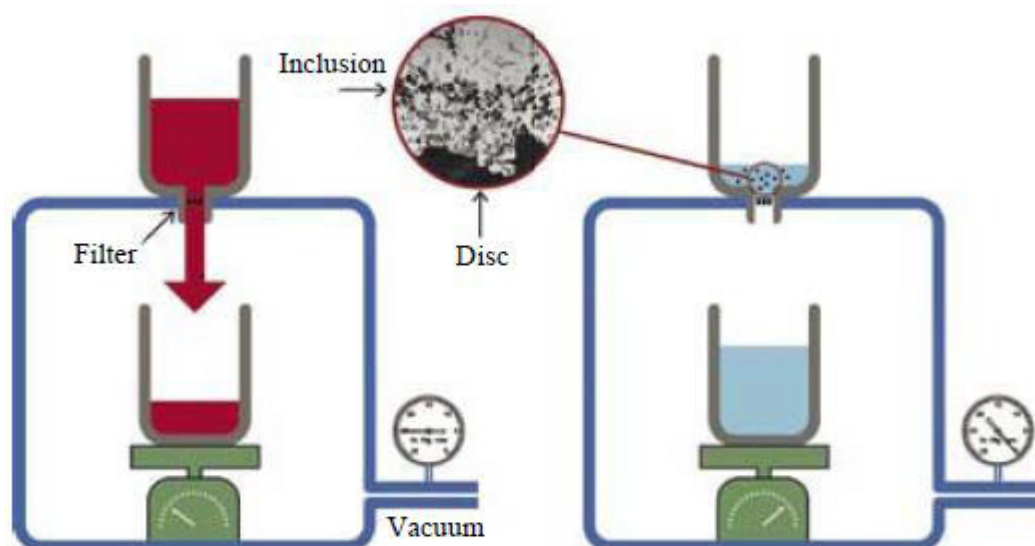
Kvalitu hliníkové taveniny je možné ovlivňovat kontrolou chemického složení, obsahu vměstků a rozpuštěných plynů (zejména vodíku). Existuje několik metod, které napomáhají zjistit přítomnost vměstků a predikovat možné vady v odlitku. Metody jako PoDFA, Prefil, LAIS, LiMCA, K-mold, Drosstest, Straube-Pfeiffer test, Ultrasonic Technique, Vmet a mnohé další.

2.4.1 Metoda PoDFA

Porous Disc Filtration Apparatus je metoda pro zhodnocení čistoty taveniny vyvinutá firmou Alcan a komercializovaná firmou ABB. Tato metoda umožňuje porovnání mezi znečištěnou taveninou a relativně čistým kovem. Je možné zjistit typ vměstku, což je ocenitelný kvalitativní aspekt při zjišťování příčiny nekvality kovu. [3]

Vlastní metoda měření je založena na profiltrování přibližně 2 kg taveniny skrz jemný porézní filtr. Vměstky se zachytí na porézním filtru a vytvoří se filtrační koláč. Filtr je možné dále rozříznout, vybrousit, vyleštit a analyzovat na světelném či elektronovém mikroskopu. [4]

Koncentrace vměstků se určuje jako mm^2/kg . Tato metoda není dost citlivá na menší koncentrace než $1 \text{ mm}^2/\text{kg}$. Problém je také se zachycením vměstků menších než $10 \mu\text{m}$. Hlavní nevýhodou testu je, že není operativní (online) a že je časově náročný. Záleží na operativnosti laboratoře. Vzhledem k pořizovacím nákladům si daná slévárna musí pečlivě promyslet, zda přístroj zakoupí. Schéma přístroje je na obr. 7. [3]

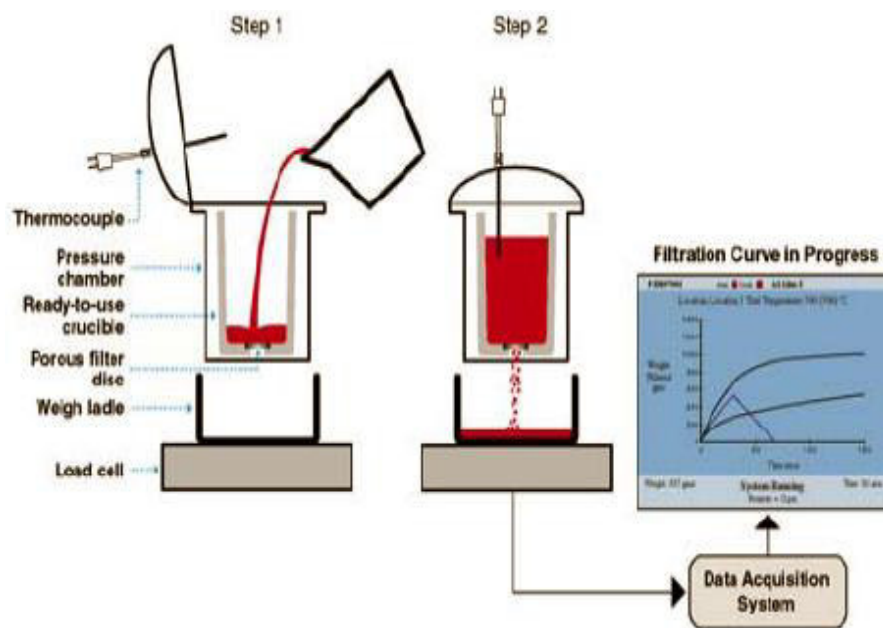


Obr. 7: Princip metody PoDFA [5]

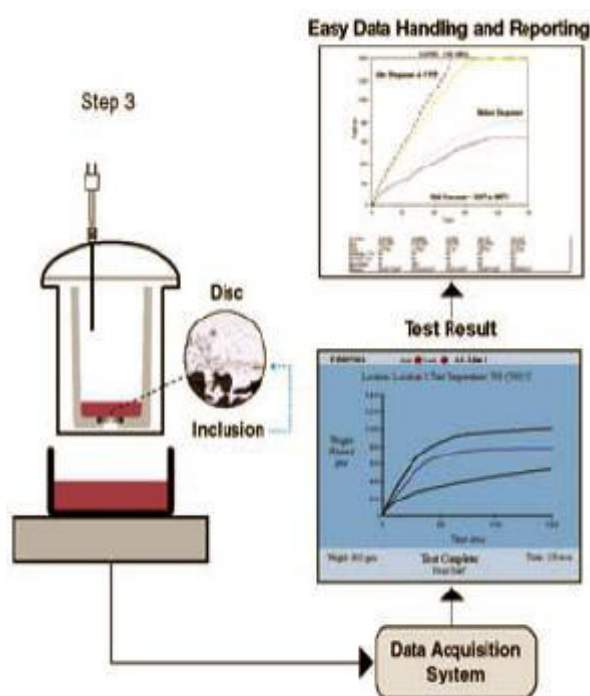
2.4.2 Metoda Prefil

Prefil test používá velice podobného principu jako PoDFA. Rozdíl je v tom, že tavenina v kelímku je přes filtr filtrována pod tlakem. Dále metoda zaznamenává závislost hmotnosti profiltrované taveniny na čase. To je hlavní výhoda oproti testu PoDFA. Z počátku je filtr dobře průtočný, ale protékáním kovu se póry filtru ucpávají oxidickými a jinými vměstkami a tvoří se filtrační koláč. Průtočnost se tedy snižuje. Závislost hmotnosti filtrátu na čase nám získá informace o obsahu vměstků v tavenině. Data lze porovnat se standardy od výrobce nebo porovnávat s jinými naměřenými daty z jiných měření. Dále je i možné analyzovat filtr po vychladnutí, jako v případě PoDFA. [3; 4]

Samotný přístroj se skládá z tlakové nádoby, uvnitř je kelímek na taveninu a na dně založený filtr. Kelímek je vyrobený z materiálu s nízkou tepelnou kapacitou a je zaizolovaný. Není nutné kelímek předehřívat. K dispozici je i termočlánek. Pod tlakovou nádobou je vázící pánve. Pomocí výpočetní techniky jsou sbírána data o hmotnosti, čase a teplotě. Systém nakonec sám vytvoří graf průběhu zkoušky. Schéma zařízení s grafickými výstupy je k nahlédnutí na obr. 8 a obr. 9. [3; 4]



Obr. 8: Prefil test – plnění a průběh zkoušky [6]



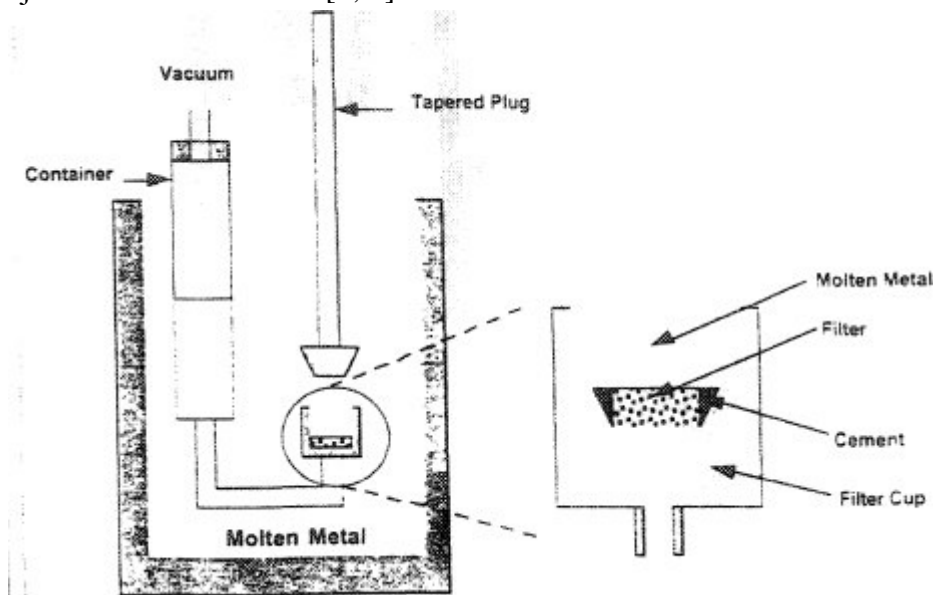
Obr. 9: Prefil – po ukončení zkoušky [6]

2.4.3 Metoda LAIS

Metoda LAIS (Liquid Aluminum Inclusion Sampling) někdy nazývána také jako Union Carbide Particulate Tester je metoda založená na principu vakuové filtrace. Princip je podobný jako metoda PoDFA. Vzorek taveniny je získán přímo uvnitř kelímku pece. Tavenina je opět filtrována přes porézní filtr a následně je filtr metalograficky

vyhodnocen. Zařízení se skládá ze zúžené zátky, filtru, filtrového kelímku a vakuové komory. [3; 7]

Princip metody spočívá v předehřátí zařízení, vložení zařízení do lázně tekutého kovu a vakuováním systému je tavenina nasávána přes filtr do sběrné nádoby. Výhodou je, že taveninu nemusíme nabírat z pece a někam přelévat, případně přehřívat. Princip zařízení je naznačen na obr. 10. [3; 7]



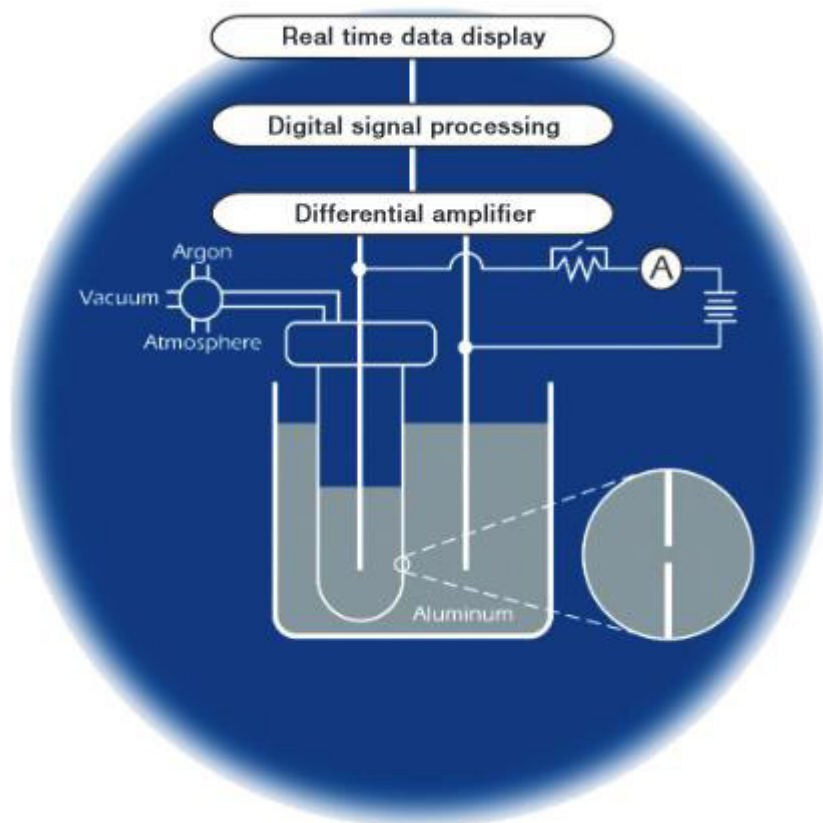
Obr. 10: Princip zařízení LAIS [3]

2.4.4 Metoda LiMCA

LiMCA (Liquid Metal Cleanless Analyzer) je metoda od firmy Alcan, která umožňuje měření čistoty taveniny v reálném čase. Tato metoda neměří znečištění objemu taveniny, ale aktuální stav čistoty v daném místě objemu taveniny. Je možné měřit velikost a počet nekovových vměstků. [8]

Metoda je založena na principu elektricky měřené zóny. Měřicí sonda je složena z elektricky izolované trubky a dvou elektrod, které jsou připojeny na zdroj napětí, který udržuje konstantní el. proud tekoucí skrz otvor v trubce. Otvor bývá o průměru 300 μm . Jakmile otvorem plují elektricky nevodivé částice, tato skutečnost se zaznamenává změnou napětí. Výchylka napětí je závislá na velikosti nečistoty a je schopná detekovat počet proteklých nečistot. [3; 8]

Tato metoda umožňuje s velkou výhodou tzv. online měření. Nevýhodou této metody je ovšem detekce větších nečistot, než je otvor v trubici. Po zacpání trubice není možné měřit průtok. Další nevýhodou je přítomnost bublin, které výchylku napětí způsobují rovněž a rozlišení bublin od vměstků je obtížné. Naopak zjišťování kovových vodivých nečistot není možné. Schéma zařízení je na obr. 11. [3; 8]



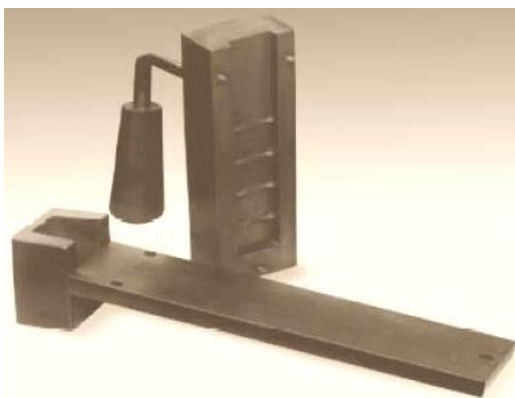
Obr. 11: Princip metody LiMCA [9]

2.4.5 K-mold

K-mold je metoda vyvinutá v Japonsku v roce 1973 Sanjem Kitaokym. Jde o vyhodnocení čistoty taveniny v makroměřítku. Výhodou této metody je snadné a rychlé vyhodnocení. K provedení a vyhodnocení testu není třeba drahých či složitých přístrojů. [10]

Princip spočívá v odlití asi 400 g taveniny do jednoduché dvoudílné kokily, která se zkompletuje pouze přiložením, bez nutnosti zajištění. Kokila je ocelová, je tedy vhodné kokilu opatřit ochranným nástřikem pro zabránění reakčních pochodů mezi ocelovou kokilou a hliníkovou slitinou. Ochranný nástřik má vliv na trvanlivost kokily, zejména kvůli skutečnosti, že v hliníkové tavenině se rozpouští železo obsažené v hojně míře v ocelové kokile. Po ošetření povrchu kokily je vhodný předehřev minimálně na 180 °C. Předehřev umožní tavenině vyšší zabíhavost a tedy kvalitnější tvar a povrch odlitku. Po odlití kovu do kokily vzorek zkrystalizuje během několika vteřin. Odlitý vzorek o rozměrech zhruba 240x36x6mm je možné jednoduše vyjmout z kokily. K-mold je zobrazena na obr. 12. [4; 10]

V odlitém vzorku se v místě zářezů zachycují hledané vměstky. Po jednoduchém nalámání v místě zářezů se vizuálně posuzuje přítomnost či nepřítomnost vměstků. Vzhled lomových ploch demonstruje obr. 13. Odlišení nekovových vměstků od oxidických filmů či bublin je možné s pomocí stereolupy. [4]



Obr. 12: K-mold [11]



Obr. 13: Vzhled lomových ploch [4]

Čistota taveniny se dále hodnotí pomocí K-mold hodnoty, která je jednoduše dána vztahem:

$$K = \frac{S}{n} \quad (3)$$

kde:

hodnota **K** je ukazatel počtu lomů s vměstkou v závislosti na celkovém počtu lomů

hodnota **S** je počet lomů s nalezeným vměstkem nebo vměstkou

hodnota **n** je počet lomů.

Každá slévárna si musí stanovit kritickou hodnotu **K**, která je považována jako hraniční.

Čím nižší je kritická hodnota K-mold, tím vyšší jsou požadavky na výslednou čistotu taveniny. [4]

2.4.6 Drosstest a Straube-Pfeifferův test

Většina sléváren neželezných kovů je vybavena přístrojem na měření indexu hustoty. Drosstest a Straube-Pfeifferův test je možné provádět na stejném zařízení.

Princip metody spočívá v odlití cca 200 g taveniny do kelímku, který je umístěný ve vakuové komoře. Ihned po nalití je nutné komoru uzavřít a vakuovat. Je důležité dosáhnout vakua dříve, než začne vzorek tuhnout. Při vakuování se dosahuje vakua 5 až 80 mBar. Vlivem snížení tlaku je možné snadné vyloučení vodíkových bublin a při současném ochlazování vzorku odspodu jsou vměstky vytlačovány s bublinami směrem k hladině kovu. Po důkladném ztuhnutí se na daném vzorku hodnotí vizuálně povrch. Je zřejmé, že metoda nemůže být kvantitativní. Je proto nutné si vytvořit nějaké porovnávací vzorky, dle kterých je možné testy hodnotit. [12]

Straube-Pfeifferův test se liší vyhodnocením. Vzorky se na rozdíl od Drosstestu rozříznou na dvě poloviny a porovnávají se plochy řezu. Množství a velikost dutin vypovídá o množství vměstků. Pro Straube-Pfeifferův test se používá podtlak 30 mBar. Příklad vzorků je na obr. 14. [13]

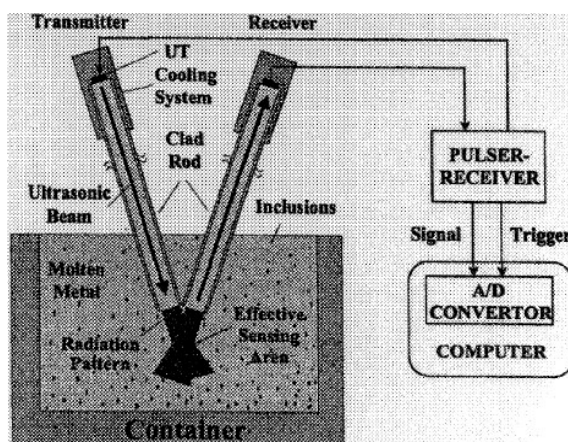


Obr. 14: Vlevo vzorek Straube-Pfeiffer, vpravo Drosstest [14]

2.4.7 Ultrasonic Technique

Většina způsobů testování čistoty taveniny je založena na odlití nějakého vzorku, který je následně v metalografické laboratoři zpracován a vyhodnocen. Tento proces však trvá nějakou dobu a v ideálním případě bychom chtěli znát stav taveniny co nejdříve. Kromě úspory času při zhotovení a vyhodnocení vzorku, je tato metoda schopná prozkoumat větší část taveniny v provozu. [3]

Ultrazvuková metoda umožňuje měření právě v čase neboli tzv. online měření. Tato metoda je založená na šíření zvuku v materiálu. V různých materiálech má totiž ultrazvuk různé rychlosti šíření. Vysílač vysílá piezoelektrickým krystalem signály skrz taveninu. Pokud v tavenině nejsou přítomny vměstky, útlumy signálu jsou velmi malé až zanedbatelné. Pokud vlny narazí na vměstek, dojde k vychýlení a útlumu. To se projeví zmenšením echa na obrazovce osciloskopu. Velikost vměstku je úměrná útlumu echa. Metoda není schopná detekce typu a tvaru vměstků. Princip metody je zobrazen na obr. 15. [3]



Obr. 15: Princip ultrazvukové detekce vměstků [3]

2.4.8 Vmet

Společnost Foseco používá tuto metodu jako standardní postup jak kvantifikovat čistotu taveniny. Zařízení je skenovací elektronový mikroskop s Vmet automatickou detekcí vměstků a pórů s možností analýzy chemického složení a velikosti vměstků. Pro provedení tohoto testu je vhodné zhotovit vzorky pomocí K-mold. Příprava vzorků je popsána v kapitole 2.4.5. Tato metoda umožňuje porovnávání čistoty taveniny po natavení, po přelévání, po odplynění nebo po udržování delší doby na teplotě. Důkladnou analýzou všech těchto stavů a operací, tedy analýzou odlitých vzorků do K-mold, lze získat přehled o čistotě taveniny a případně upravovat dílčí části výrobního procesu pro zlepšení kvality kovu. Během jedné hodiny je možné analyzovat tisíce vměstků. [15]

Metoda stanovuje tzv. index čistoty:

$$I = \frac{S_i}{S} * 100^2 \quad (4)$$

kde:

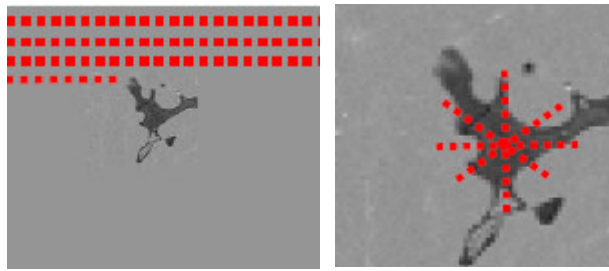
hodnota **I** je index čistoty

hodnota **S_i** je plocha inkluzí

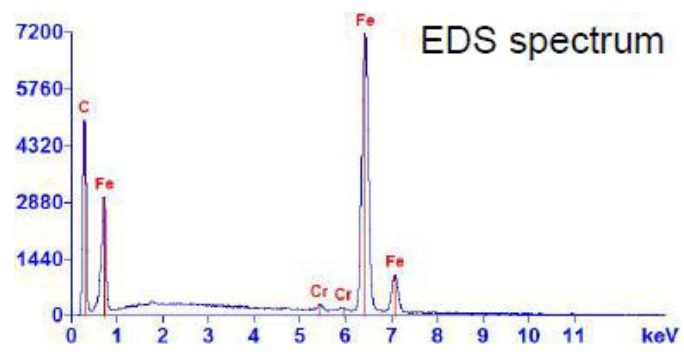
hodnota **S** je celková plocha.

To znamená, že pokud je plocha inkluzí 1 %, index čistoty je 100. [16]

Dále se v daném vzorku určuje celkový a jednotlivý počet nečistot (póry, oxidy hliníku a další oxidy), velikosti nečistot v určitých rozsazích velikostí (v mikrometrech) a obsah stěrů. Na obr. 16 je naznačený princip detekce inkluze a na obr. 17 je příklad EDS spektra neboli chemické složení vměstku. [15]



Obr. 16: Pozice vměstku (vlevo), tvar vměstku (vpravo) [16]



Obr. 17: Určení chemického složení vměstku [16]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Cíle

Cílem diplomové práce je analýza nekovových vměstků, které se vyskytují v odlitcích hlav spalovacích motorů. Jedná se o hliníkovou slitinu typu silumin AlSi7MgCu0,5. Dále se práce zabývá návrhy na odstranění těchto vměstků z kovu. Praktické úkoly této práce jsou zaměřeny na řešení konkrétního problému ve slévárenském provozu.

3.2 Představení firmy

Experimentální část je prováděna ve slévárně Nemač Czech Republic, s.r.o. v Havraní u Mostu. Slévárna se zabývá sériovou výrobou hlav spalovacích motorů z hliníkových slitin pro automobilky Volvo a Jaguar Land Rover. Konkrétní nečistoty v kovu se týkají produktu AJ 200 D, tedy hlav pro vznětové motory Ingenium značky Jaguar. Odlitky se vyrábějí technologií sklopného lití Rotacast® v kokilách.

3.3 Odlévaná slitina

Jedná se o slitinu hliníku a křemíku a dalších příměsí, jedná se tedy o tzv. silumin. Slitina se označuje jako EN AC-45500 nebo také EN AC-AlSi7MgCu0,5. Obsah hořčíku se průměrně pohybuje kolem 0,3 hm% a dodává slitině schopnost vytvrzení tepelným zpracováním. Obsah mědi má v tomto případě pozitivní vliv na obrobiteľnosť. Vstupní složení ingotů a výrobní složení slitiny je v tabulce 1 a tabulce 2.

Tabulka 1: Vstupní složení ingotů

Hliníková slitina – EN AC-45500, AlSi7MgCu _{0,5}																				
Typ produktu	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Sn	Pb	Ni	P	Ca	Cr	*Bi	Na	*Cd	*Li	Sr	Sb	B
Jaguar	MIN	6,50	0,48	-	0,05	0,37	-	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,020	-	-
	MAX	7,50	0,55	0,15	0,1	0,45	0,07	0,15	0,03	0,03	0,0015	0,0020	0,03	0,03	0,005	0,01	0,005	0,027	0,0050	0,03

Tabulka 2: Výrobní složení slitiny

Hliníková slitina – EN AC-45500, AlSi7MgCu _{0,5}																	
Typ produktu	Si	Cu	Fe	Mn	Mg		Zn	Ti	Sb	P	Ca	Sr		Ni	Pb	Sn	
					Udržovací pec	Tavící pec						Udržovací pec	Tavící pec				
Jaguar	MIN	6,5	0,4	0	0,05	0,3	0,3	0	0,1	0	0	0	0,015	0,015	0	0	0
	MAX	7,5	0,6	0,2	0,1	0,45	0,45	0,07	0,2	50ppm	15ppm	20ppm	0,025	0,025	0,03	0,03	0,03

3.4 Popis výrobního procesu

Jedná se o sériovou výrobu hlav spalovacích motorů pro automobilku Jaguar Land Rover. Odlévání se provádí technologií sklopného lití do kokil. Pro výrobu dutin v odlitku se používají písková jádra vyráběná metodou Cold Box a Hot Box.

Tavení

Vsázka pro přípravu taveniny se skládá z ingotů slitiny AlSi7MgCu0,5 od různých dodavatelů. Velkou část vsázky tvoří také vratný materiál v podobě nálitků či vadných neopravitelných odlitků. Kombinace ingotů a vratného materiálu se taví zřídka. Ve většině případů se taví 100 % ingotů nebo 100 % vratného materiálu. Vsázení do pece probíhá ručně bez předehřevu vsázky. Vsází se do tekutého zbytku.

Jako tavící agregáty se používají dvě plynové kelímkové pece od firmy Realistic uložené v tandemu (obr. 18). Pec je vybavena izostaticky lisovanými kelímkami *Noltina Syncarb* o kapacitě 1000 kg hliníkové slitiny. Kelímky jsou jílografitové s obsahem SiC. Povrch kelímků je dvakrát impregnován, z toho jednou v autoklávu pod vysokým tlakem. Kelímky jsou dvakrát vypalované.

Kelímek je z vnější části ohříván plamenem vedeným tangenciálně k povrchu kelímku. Měření teplot v peci je prováděno pomocí dvou termočlánků typu K. Jeden termočlánek měří teplotu uvnitř pece ve dvou třetinách výšky kelímku nad hořákem. Druhý termočlánek je zavrtaný ve stěně kelímku a měří teplotu stěny kelímku, nikoliv přímo teplotu taveniny. Chod hořáku řídí PID regulátor a nastavená cílová teplota je 820 °C. Konkrétní teploty termočlánků v peci jsou znázorněny na obr. 19. Pro každou pec tedy dva termočlánky, kde červené hodnoty jsou aktuální teploty a zelené hodnoty jsou teploty nastavené jako cílové.



Obr. 18: Tavící plynové kelímkové pece Realistic [zdroj: vlastní]



Obr. 19: Teploty termočlánků v tavní peci [zdroj: vlastní]

Transport taveniny

Tavenina se z tavní do udržovací pece transportuje v transportních pánvích, které jsou vybaveny vyzdívkou Insural. Tato vyzdívka má dobré izolační schopnosti s poklesem teploty na vzduchu při plné pánvi $3^{\circ}\text{C}/\text{minutu}$. Dále je materiál dobře nesmáčivý. Tato vlastnost je velmi důležitá pro usazování oxidických blan a nekovových vměstků. Pánve se předehřívají plynovým hořákem na teplotu kolem 380°C (obr. 20). [20]



Obr. 20: Předehřev pánve [zdroj: vlastní]

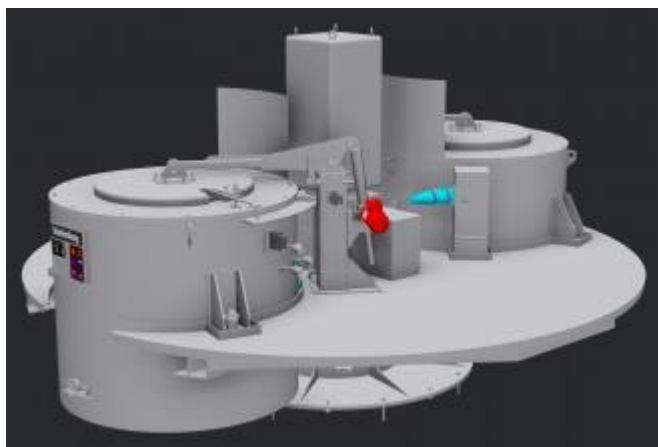
Po nalití přibližně 750 kg taveniny do pánve se neprovádí žádná rafinační úprava. Dále se pánve převezve k udržovací peci, kde se tavenina přelévá pomocí přelévacího žlabu (obr. 21) do udržovací pece.



Obr. 21: Přelévací žlab [zdroj: vlastní]

Udržovací pec

Stanoviště udržovacích pecí je provedeno jako dvoupecí na otočném stole od firmy Hindenlang. Na obr. 22 je 3D model dvoupecí a na obr. 23 je reálné soupecí. Vždy je jedna pec v poloze pracovní, z které robot pomocí lící lžice odebírá taveninu. Druhá pec je otočená do polohy, ve které je možné doplňování z transportní pánve pomocí nalévacího žlabu a následně je provedena úprava taveniny. Dvoupecí je vybaveno odplyňovacím rotorovým zařízením též od firmy Hindenlang (obr. 24).



Obr. 22: Otočný stůl se dvěma kelímkovými udržovacími pecemi [21]



Obr. 23: Udržovací pece Hindenlang [zdroj: vlastní]

Pece jsou elektrické odporové s jílografitovými kelímky *Noltina Grafit*, které mají menší podíl SiC než tavící kelímky. Objem kelímků je 961 dm³. Kelímky jsou vzhledem k velikosti vyráběné vytáčením, nikoliv izostatickým lisováním. Tavenina v kelímku se elektrickým ohřevem udržuje na 750 – 755 °C. Měření teploty se provádí termočlánkem typu K ponořeným do taveniny.

Po doplnění kelímku pece se zahájí proces odplynění. Nejdříve se nechá grafitový rotor nahřát nad hladinou taveniny po dobu 5 minut. Poté se rotor vnoří pod hladinu a za rotace při průchodu dusíku z rotoru do taveniny probíhá odplyňování po dobu 18 minut (obr. 25). Po vytažení rotoru z kovu se rotor očistí od nánosů strusky a vyčistí se hladina od strusky. Následuje odběr vzorků pro měření naplynění (dichte index) a vzorek pro spektrální analýzu. Dále je pec připravena do pracovní polohy. Po vyprázdnění druhé pece se soupecí otočí o ½ otáčky.

Hodnota dichte indexu se stanoví dle vztahu:

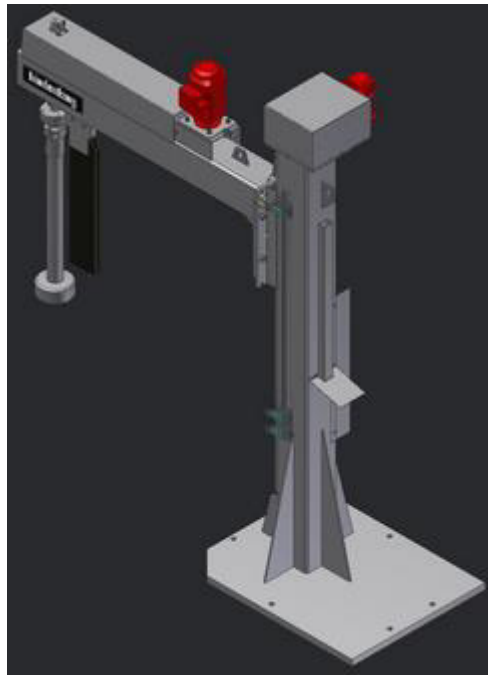
$$DI = \frac{(\rho_{atm} - \rho_{vak})}{\rho_{atm}} * 100 \quad (5)$$

kde:

hodnota **DI** je dichte index [%]

hodnota ρ_{atm} je hustota vzorku ztuhlého za atmosférického tlaku [g/cm³]

hodnota ρ_{vak} je hustota vzorku ztuhlého za podtlaku [g/cm³].



Obr. 24: Odplyňovací rotorové zařízení Hindenlang [21]



Obr. 25: Odplyňování taveniny [zdroj: vlastní]

Odlévání

Tavenina je z udržovací pece dopravována ke kokilám průmyslovým robotem s lící lžící. Lící lžice od firmy Pyrotec je keramická, odolná proti erozi, odolná vůči teplotním šokům, proti nalepování kovu a má velmi nízkou tepelnou vodivost. Tyto vlastnosti udávají vysokou trvanlivost a nízká tepelná vodivost dovoluje nižší teplotu kovu v udržovací peci. Lžice je opatřena ochranným nátěrem a nástřikem. Nátěr lžice Deltacast 696 zabraňuje adhezi kovu či strusky a má i izolační schopnost. Vzhledem k tomu, že se odlévá technologií Rotacast, kde není vtoková soustava, robot nalévá

taveninu z keramické lžice do lícího boxu. Lící box je keramická vana, která se přitiskne ke kokile a rotací celého systému o 180° dojde k odlití.

Dokončovací operace

Po vyjmutí a vychladnutí odlitku následuje odjádrování pomocí vibrátorů. Dále je z odlitku odříznut náletek a obroušeny přetoky a nedokonalosti v rámci visuální kontroly.

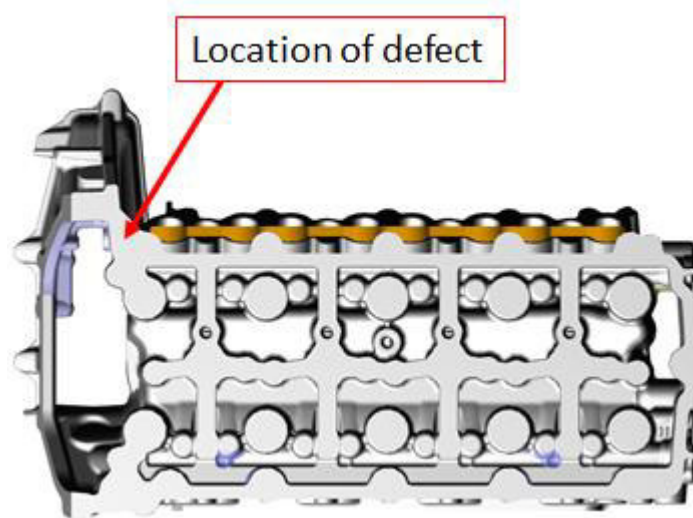
3.5 Analýza vměstků

Hlavy spalovacích motorů z hliníkových slitin, jsou značně tepelně i mechanicky namáhané součásti. Kromě vhodných pevnostních charakteristik a dostatečných tažností, dosahovaných ovlivňováním struktury kovu, je nutné zabezpečit i čistotu kovu. Kromě mikrostáženin, ředin a prasklin, mohou i vměstky v základním materiálu ovlivňovat těsnost jednotlivých stěn mezi složitými kanály uvnitř hlav. Při následném mechanickém opracování odlitků mají tvrdé vměstky negativní vliv na obráběcí nástroje a stroje. Proto je nutné kontrolovat velikost, množství a výskyt nečistot v kovu.

3.5.1 Výskyt vměstků

Odlitek se po odříznutí nálitku, očištění přetoků a vizuální kontrole dále zasílá na třískové obrábění. Po obrobení funkčních ploch odlitku, se na některých z nich vizuálně objeví černé tečky v kovu, tedy vměstky. Tyto vměstky se vždy objeví jen v jedné části odlitku, jak je lokalizováno na obr. 26. Uspořádání vměstků v místě výskytu není nahodilé a vměstky vždy téměř kopírují přímku, jak je vidět na obr. 28.

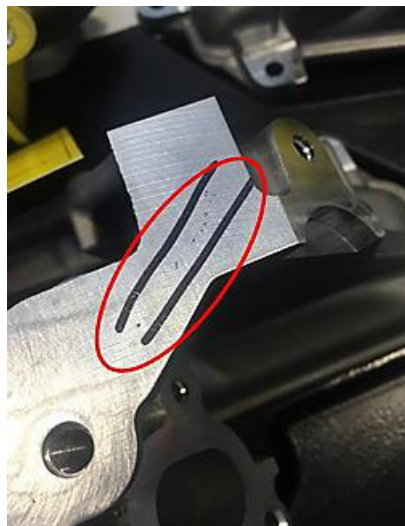
Pro analýzu konkrétních vměstků v odlitcích bylo vyčleněno několik obroběných odlitků, které vykazovaly přítomnost vměstků. Tyto odlitky byly po visuální kontrole klasifikovány jako vadné, tedy neshodné kusy. Celkem bylo vyčleněno 7 kusů pro dané bližší zkoumání. Kusy byly označeny dle produktu jako 200DX, kde X je číslování od 1 do 7.



Obr. 26: Oblast vměstků [zdroj: vlastní]



Obr. 27: Postižené části odlitku [zdroj: vlastní]



Obr. 28: Přímkové uspořádání vměstků [zdroj: vlastní]



Obr. 29: Vyleštěná část odlitku [zdroj: vlastní]

V tabulce 3 je znázorněné využití vzorků pro konkrétní testy. Na všech vzorcích byly provedeny experimenty pro určení čistoty slitiny. Byly vybrány pouze odlitky, na kterých je přítomnost nečistot makroskopicky nejvíce zřetelná. Vzorky 200D2 a 200D3 byly rozřezány a bylo zjištěno, že v obou případech jsou vměstky i v hloubce několika centimetrů pod zkoumaným povrchem v odlitku.

Tabulka 3: Rozřazení testovaných vzorků dle použitých metod

↓Operace/→Č. vzorku	200D1	200D2	200D3	200D4	200D5	200D6	200D7
Zalisování			✓	✓	✓		
Rozřezání		✓	✓				
Broušení a leštění	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Optický mikroskop			✓	✓	✓		
Elektronový mikroskop	✓	✓					
Chemické složení vměstků	✓	✓					
Měření tvrdosti dle Vickerse						✓	✓

3.5.2 Analýza tvrdosti vměstků

Vzhledem k velikosti vměstků je vhodné použít zkoušku tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení. Měření bylo provedeno ve dvou nezávislých institucích z důvodů porovnání výsledků. V jednom případě měření HV 0,5 a v druhém HV 0,3. Uvedená čísla představují přibližně desetinu hodnoty zatížení vtiskovacího tělíska. Vtiskovacím tělískem je jehlan o čtvercové podstavě a vrcholovým úhlem 136°. Čím menší je zatížení, tím menší je také vtisk a tím obtížněji se měří jeho velikost. Proto je nutné povrch dobře vyleštit.

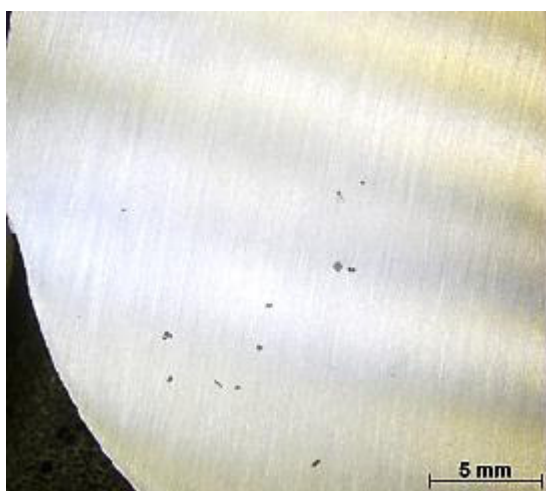
Měření tvrdosti v laboratoři Nematik Linz

Z jednoho odlitku (200D6) byly vyříznuty z postižené zóny dva vzorky. Na jednom vzorku byly vměstky zkoumány v horizontálním směru a na druhém ve vertikálním směru.

Vzorky byly na daných plochách vybroušeny (obr. 30 a obr. 31), vyleštěny a bylo provedeno měření tvrdosti HV 0,5. Vměstky jsou vidět jako černé tečky znatelné pouhým okem.

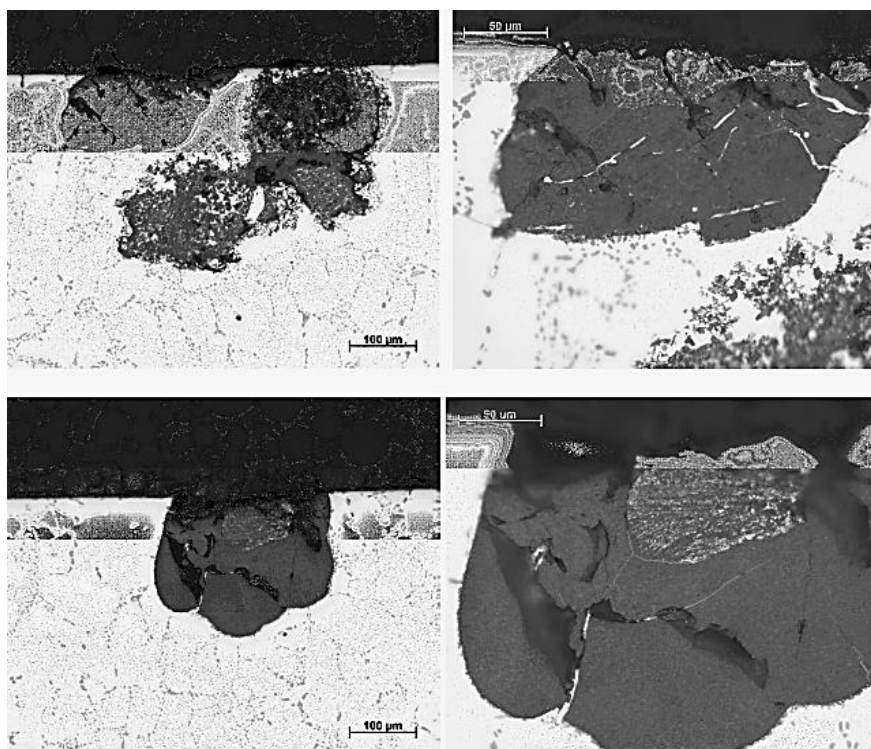


Obr. 30: Rozložení vměstků v horizontálním směru po broušení [zdroj: vlastní]

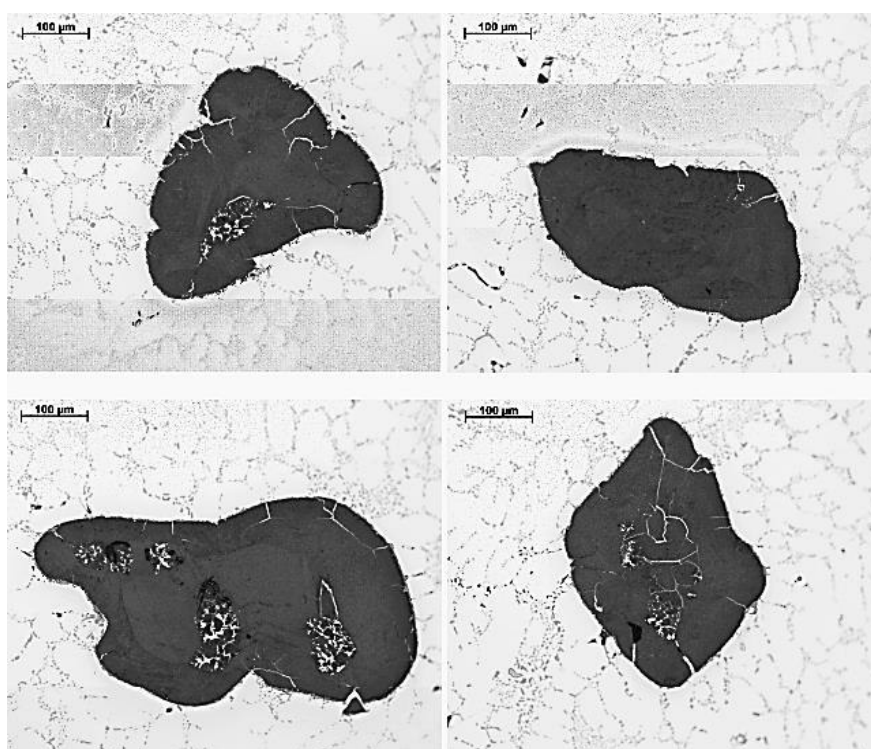


Obr. 31: Rozložení vměstků ve vertikálním směru po broušení [zdroj: vlastní]

Na obr. 32 a obr. 33 jsou fotografie ze světelného mikroskopu. Je patrné, že vměstky jsou kompaktní a že do jejich hloubky proniká základní materiál, tedy silumin. Složení vměstků se zdá být nehomogenní. Jejich velikosti se pohybují od 250 do 550 μm .



Obr. 32: Ve vertikálním směru po leštění – optický mikroskop [zdroj: vlastní]



Obr. 33: V horizontálním směru po leštění – optický mikroskop [zdroj: vlastní]

Měření tvrdosti v laboratoři na VUT

Na vzorku 200D7 bylo v laboratoři na Ústavu materiálových věd a inženýrství na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně provedeno měření tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení HV 0,3. Bylo naměřeno 5 hodnot, které jsou k nahlédnutí v tabulce 4.

Tabulka 4: Hodnoty tvrdosti HV 0,3 [22]

měření	1	2	3	4	5
tvrdost HV 0,3	1369	1205	1224	1382	1322

Vyhodnocení

Měřením laboratoře Nemark Linz bylo naměřeno, že se hodnota tvrdosti vměstků pohybuje mezi 1100 a 1440 HV 0,5. Z měření laboratoře na VUT bylo naměřeno, že se hodnoty tvrdosti pohybují mezi 1200 a 1380 HV 0,3.

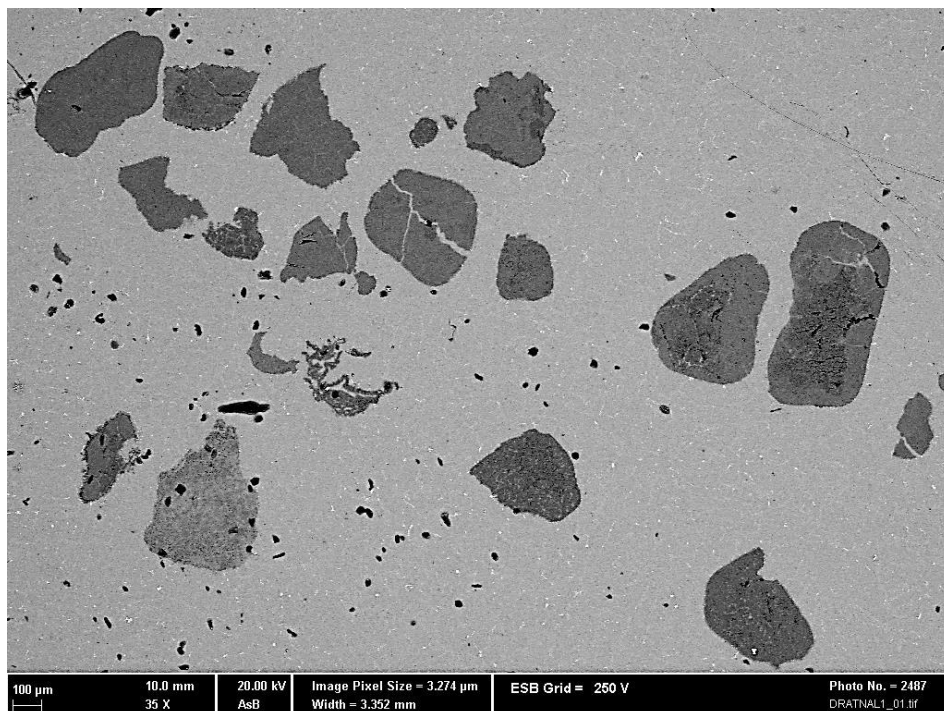
Vměstky nejsou zcela homogenní a do nitra proniká základní materiál. To je pravděpodobně důvod rozptylu naměřených hodnot tvrdostí. Teoretická hodnota tvrdosti oxidu Al_2O_3 je 2070 HV. Teoretická hodnota tvrdosti oxidu MgO je 633 HV.

Dle protokolů o měření tvrdosti v laboratořích Nemark Linz a na VUT, je pravděpodobné, že vměstky se skládají ze spinelu $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, který vzniká při dlouhodobém přehřívání a udržování taveniny nad 700 °C. Protokoly o měření tvrdosti z laboratoří jsou v příloze 1.

3.5.3 Velikost a tvar vměstků - SEM

Vzorek 200D1 byl po vybroušení a vyleštění pozorován na skenovacím elektronovém mikroskopu. Bylo pořízeno několik snímků s rozlišením, které umožňuje posoudit tvar, rozložení, velikost, pórovitost a homogenitu vměstků. Některé snímky jsou pro úplnost k nahlédnutí v příloze 2.

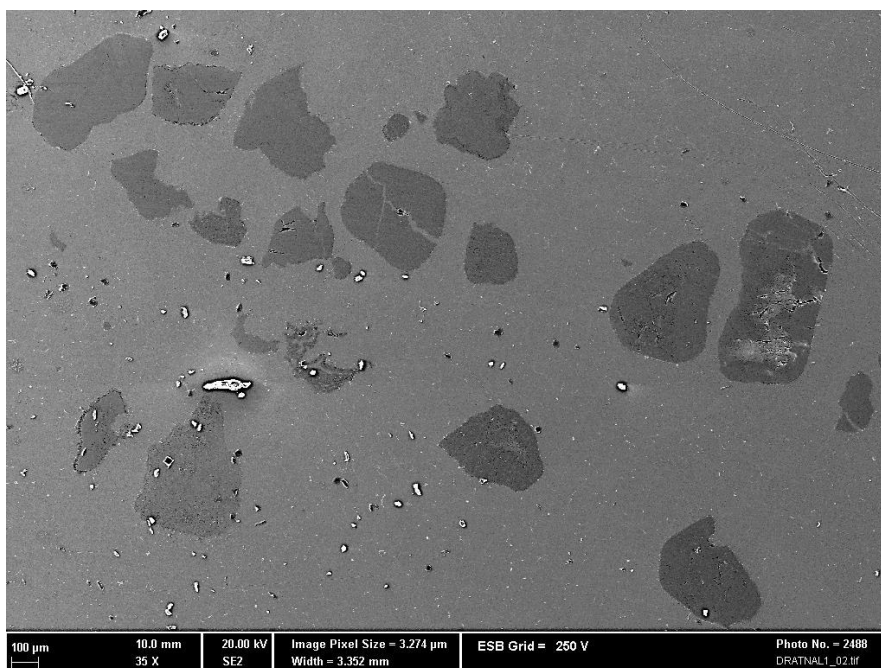
Vzorek 200D1:



Obr. 34: Uspořádání vměstků – SEM

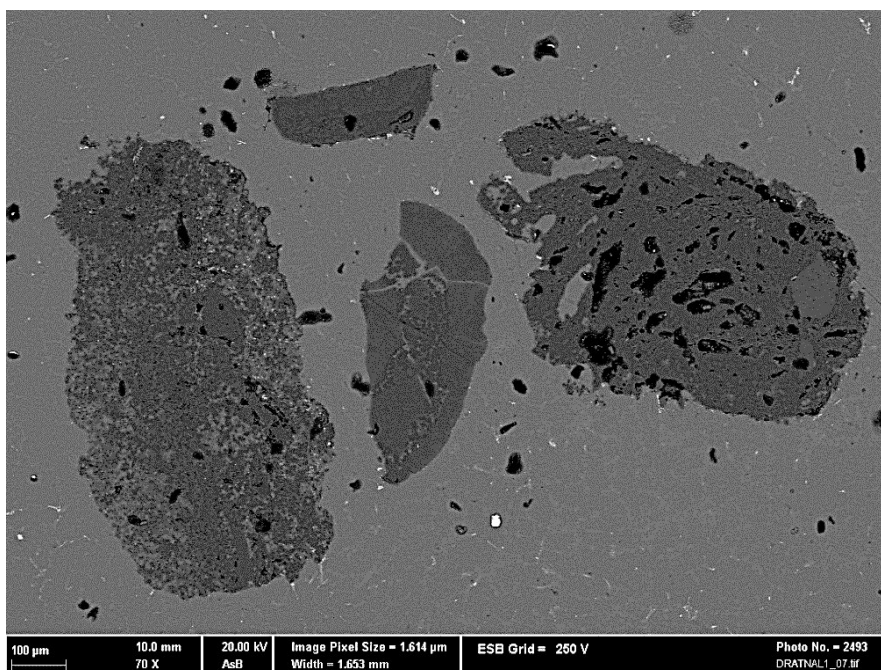
Na obr. 34 je vyobrazeno uspořádání nekovových vměstků uvnitř základního materiálu. Některé částice mají tvar více zakulacený či oválný. Jsou však zde i útvary s ostrými hranami. Většina útvarů je zcela kompaktní s rozměry od 80 µm až do 900 µm. Většina vměstků má velikost mezi 300 až 600 µm. Vměstky jsou většinou rovnoosé. Na obr. 35 je v porovnání s obr. 34 rozlišení prachových částí na povrchu snímaného vzorku. Díky sekundárním elektronům jsou tyto částice vysoce nabitě a prosvícené, což znamená, že jsou nad povrchem vzorku a nejsou součástí tělesa. Lze je tedy vyloučit z pozorování.

Na rozhraní základního kovu a vměstku je vidět ostrý přechod, mezi materiály tedy neprobíhá významná reakce. Na obr. 34 je jeden útvar rozdělený na 3 části, vměstek tedy před ztuhnutím kovu praskl.



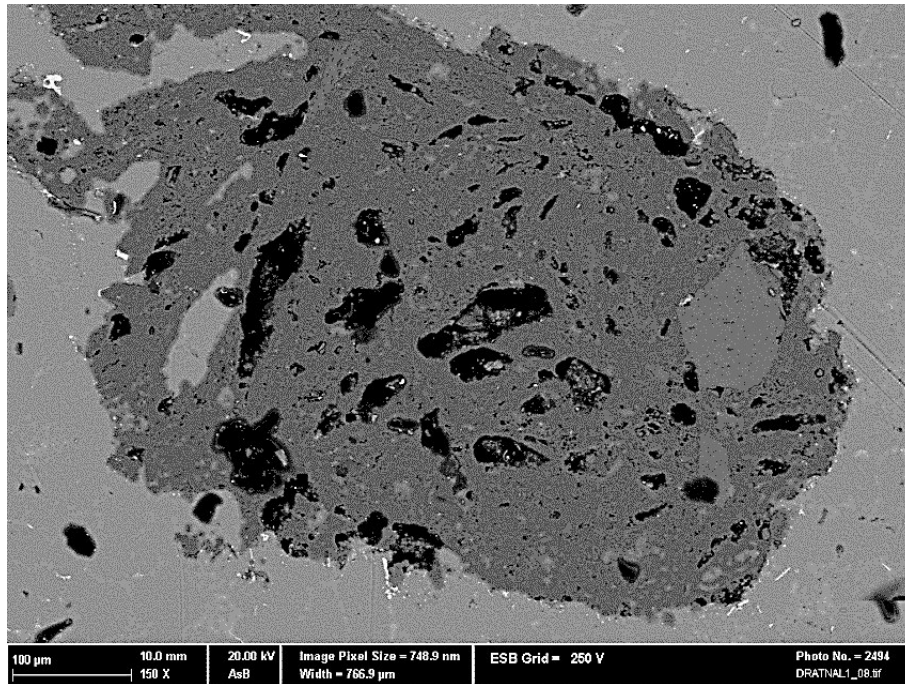
Obr. 35: Uspořádání vměstků – SEM (prachové částice na povrchu)

Obr. 36 ukazuje morfologii několika vměstků. Malé černé tečky jsou opět prachové nečistoty a nejsou součástí zkoumaného tělesa. Jak je vidět, inkluze nejsou kompaktní, ale jsou pórovité. Prostřední útvar je opět rozdělený a prorostlý základním kovem. Složení se zdá být nehomogenní a povrchy nejsou tolik zakulacené, spíše členité. Velikosti se pohybují v rozmezí 0,4 až 0,7 mm. Je možné, že se jedná o směs strusky a dalších útvarů. Přesné složení by bylo možné určit pomocí mikroanalýzy.



Obr. 36: Morfologie vměstků – SEM

Obr. 37 zobrazuje morfologii inkluze z obr. 36 s větším zvětšením. Povrch je členitý, vměstek značně pórovitý a velikost je 0,6 mm. V pravé části snímku je patrný útvar, který je homogenní, celistvý a vnořený do pórovitého útvaru. Složení vměstku se zdá být nehomogenní.



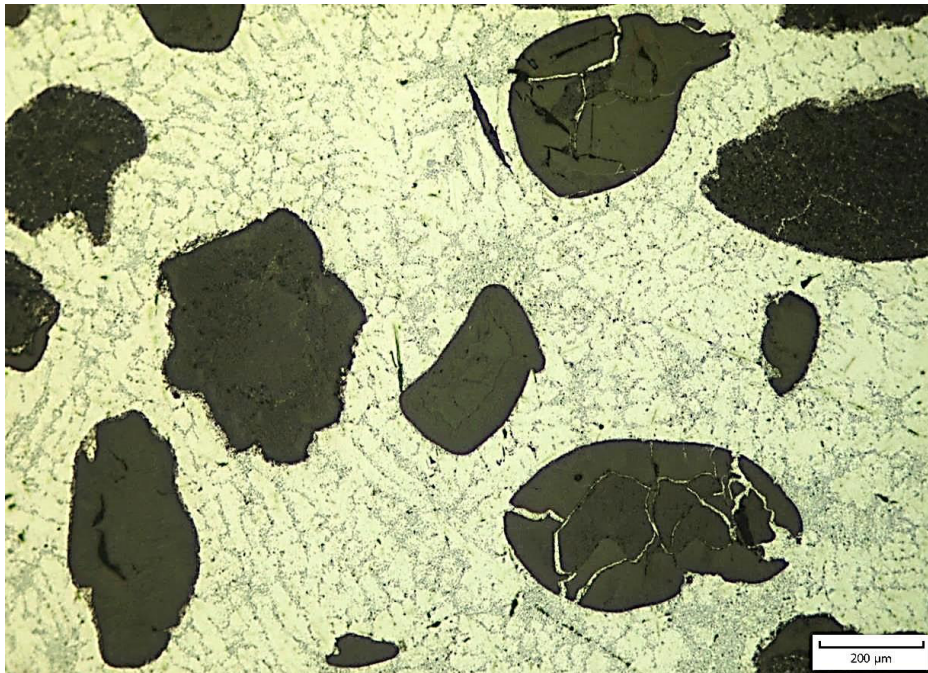
Obr. 37: Morfologie vměstku – SEM

3.5.4 Velikost a tvar vměstků – světelný mikroskop

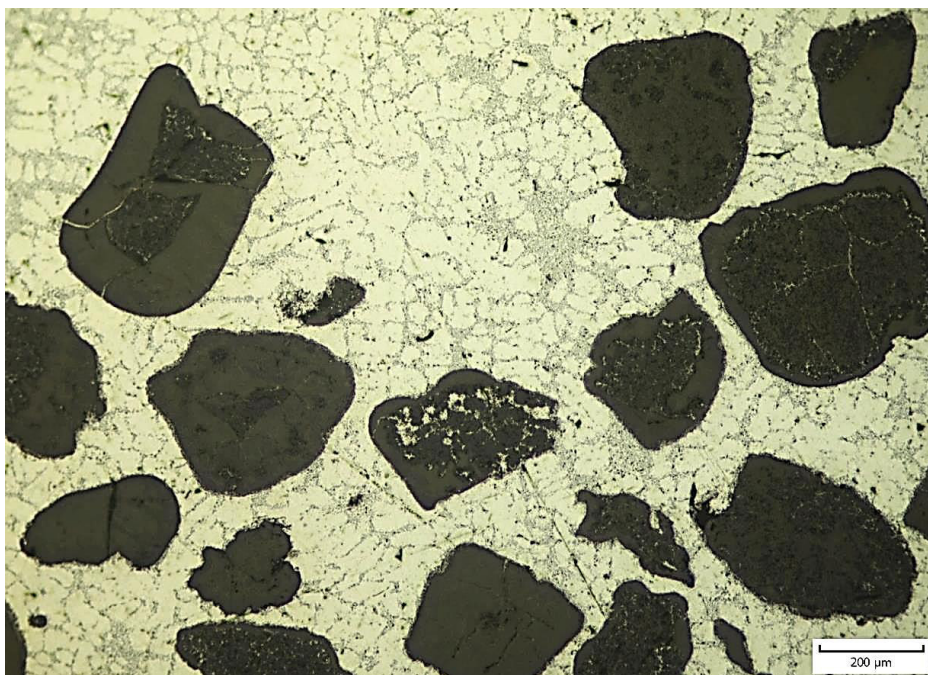
Vzorky 200D3, 200D4, 200D5 byly před pozorováním nařezány na kotoučové rozbřušovače Struers Labotom 3 a následně zalisovány do plastové hmoty pro jednodušší broušení a leštění. Průměr výlisků byl 30 mm. Poté byly vybroušeny na přístroji Struers Labopol-5. Byly použity brusné papíry s brusivem SiC o drsnostech 800 a 1200 μm s průplachem vody. Dále byly vzorky leštěny leštící suspenzí DiaDuo-2 od výrobce Struers o drsnostech 9 μm , 3 μm a 1 μm . Některé snímky jsou uvedeny v příloze 2.

Na obr. 38 a obr. 39 je vyobrazeno rozložení nekovových vměstků. I když se jedná o vzorky vyříznuté z jiných odlitků, než tomu bylo v případě elektronového mikroskopu, je zřejmé, že vměstky jsou stejného typu. Mají zakulacené tvary, velikosti se pohybují od 200 do 400 μm . Některé vměstky jsou prasklé a praskliny jsou vyplněny základním kovem – čili vměstky tam jsou už pravděpodobně v době, kdy je základní kov tekutý. Vměstky tedy nevznikají v průběhu tuhnutí. Vměstky se vyskytují vždy v určité linii, která by mohla odpovídat tepelné ose, což by mohlo naznačovat, že jsou do těchto míst z tuhnoucího kovu postupně vytlačovány.

Vzorek 200D3:



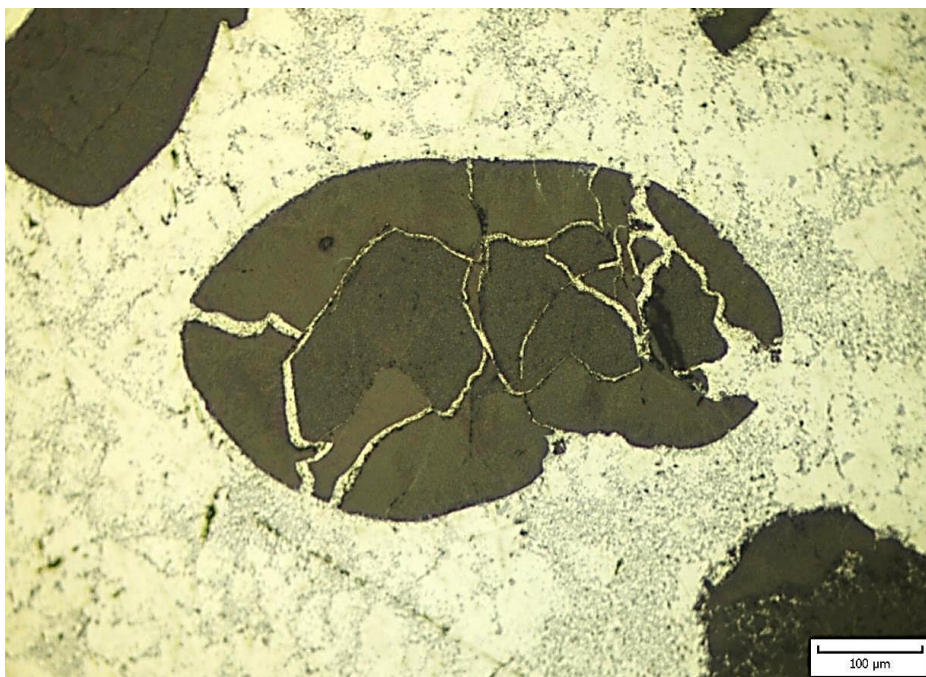
Obr. 38: Uspořádání a velikosti vměstků – světelný mikroskop [zdroj: vlastní]



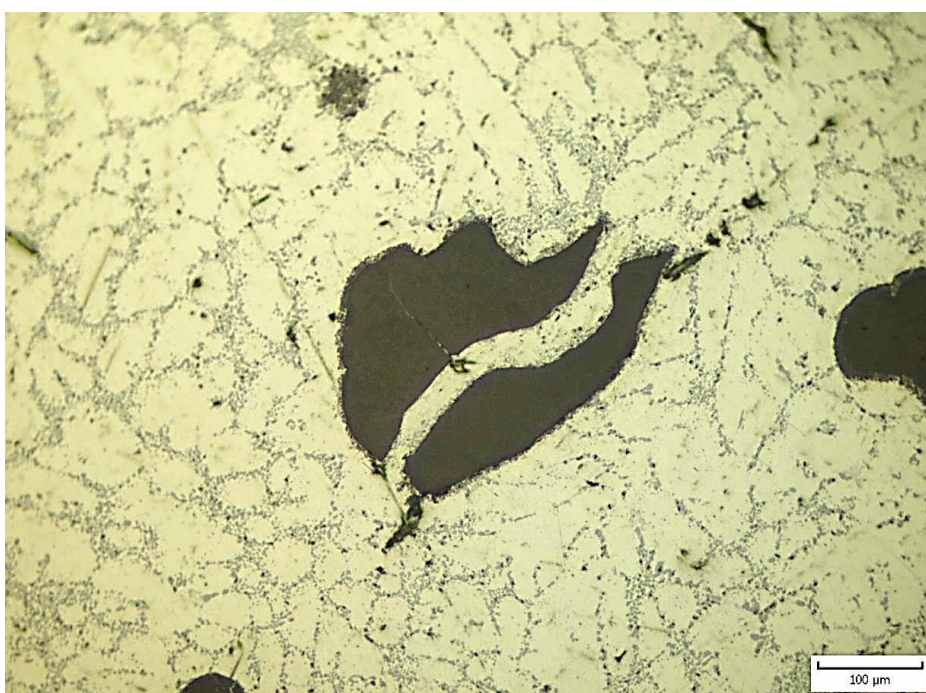
Obr. 39: Uspořádání a velikosti vměstků - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]

Na obr. 40 je detail vmětku o velikosti 400 μm. Vměstek je rozdělený na mnoho částí a je prorostlý eutektikem. Praskliny pravděpodobně vznikají před dosažením eutektické teploty. Vzhledem k tomu, že části vmětku jsou od sebe vzdáleny jen

jednotky či desítky mikrometrů, k popraskání a rozpadu vměstku nejspíš došlo v situaci, kdy je tavenina v klidu. Taková situace odpovídá situaci po odlití do formy. Dle ostrých hranic mezi nekovovou částicí a základním kovem je patrné, že se jedná opravdu o makroskopický vměstek, který není součástí struktury. Na obr. 41 je taktéž detail vměstku, skládající se v tomto případě ze dvou částí, mezi kterými je základní kov.



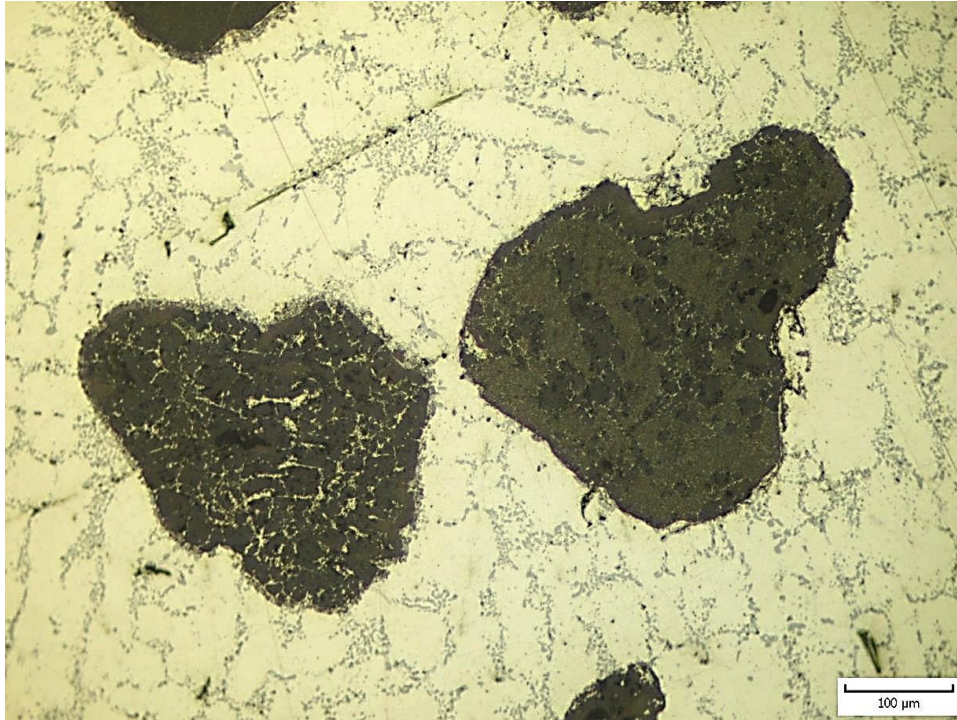
Obr. 40: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]



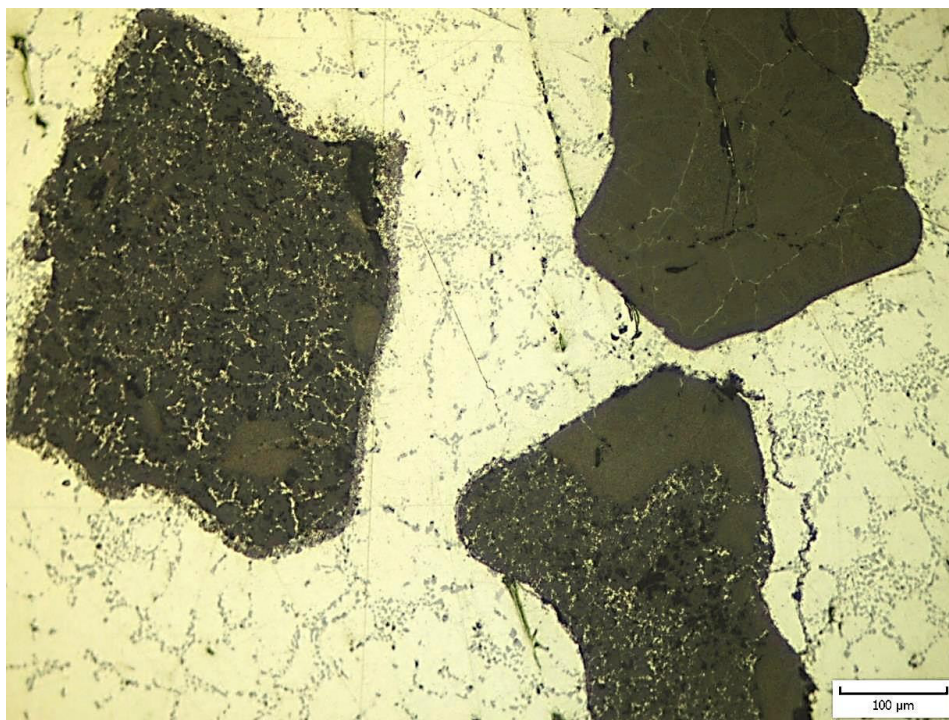
Obr. 41: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]

Vzorek 200D4:

Na obr. 42 jsou detaily dvou vměstků. Na levé straně je vměstek, který je nehomogenní a v celém průřezu impregnovaný základním kovem. Velikosti obou vměstků jsou přibližně okolo 300 μm . Vpravo je vměstek, který je pórovitý. Na obr. 43 dole je vměstek, kde je z části homogenní částice a zbytek porézní a prorostlý základním kovem.



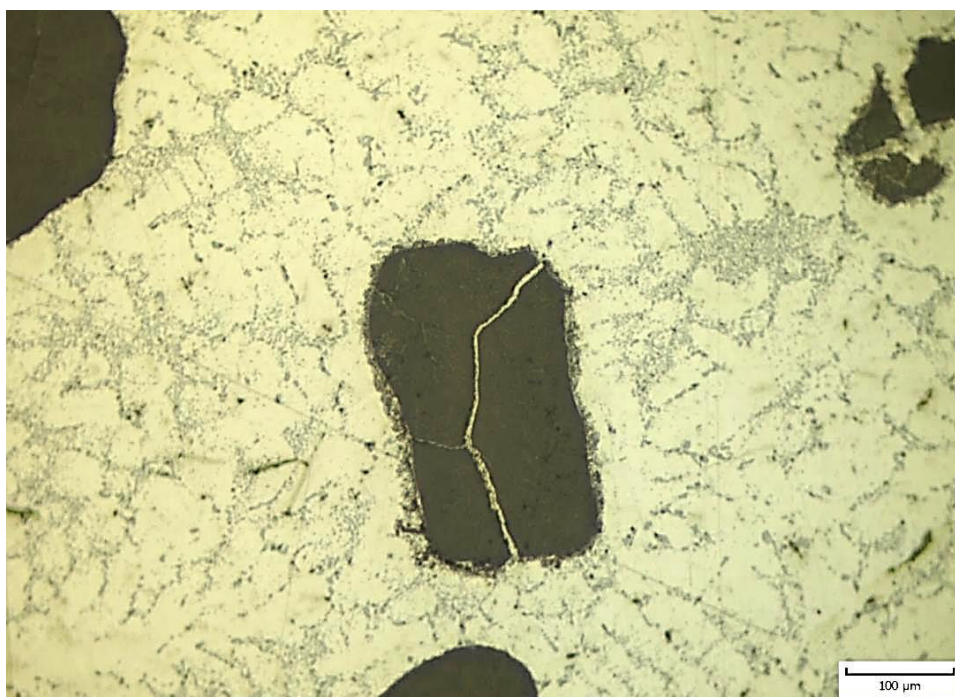
Obr. 42: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]



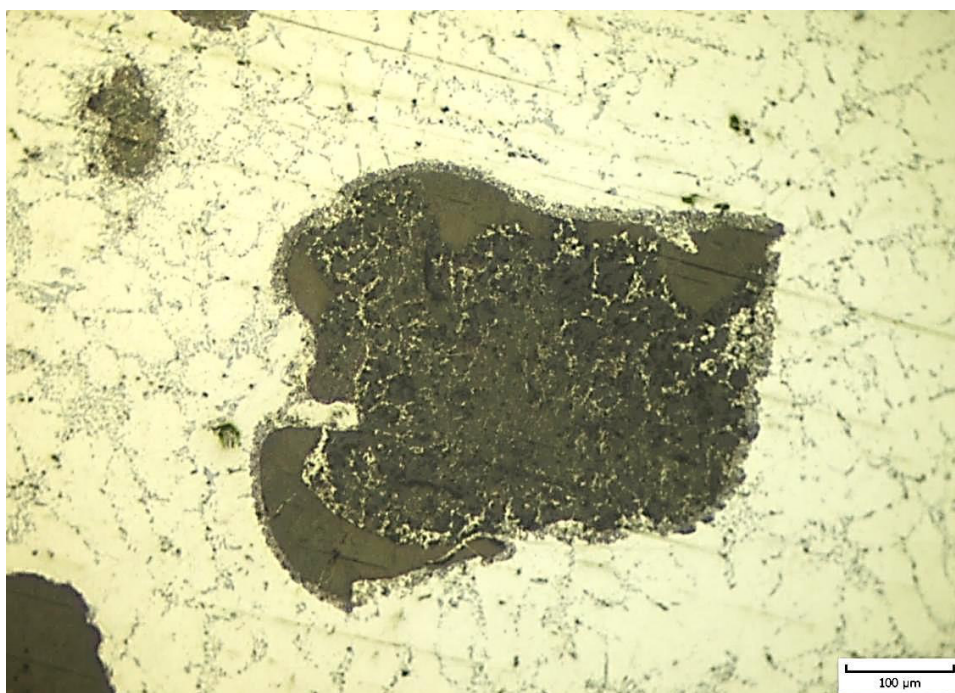
Obr. 43: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]

Vzorek 200D5:

Na obr. 44 je vměstek o velikosti 250 μm , který je v celém svém průřezu rozdělený jednou prasklinou. Obě poloviny vměstku se vzájemně v podstatě nepohybovali. Je pravděpodobné, že při vzniku praskliny, musel být kov v klidu. Na obr. 45 je detail vměstku, který je silně prorostlý základním kovem.



Obr. 44: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]



Obr. 45: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]

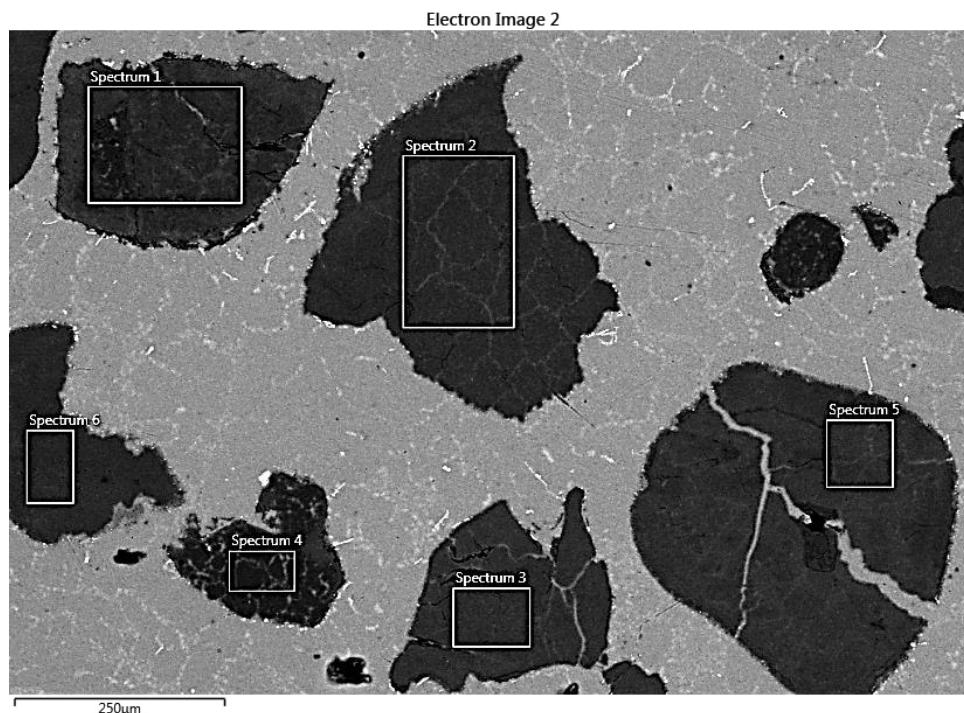
3.5.5 Analýza chemického složení vměstků - SEM

Za předpokladu, že dané nečistoty vznikají jako produkty metalurgických pochodů, je vzhledem ke složení slitiny pravděpodobné, že mohou vznikat oxidací prvků obsažených ve slitině. Některé nečistoty rostou do velikostí, které už jsou nepřijatelné pro zdravotnost odlitku.

Chemické složení vměstků je možné určit pomocí elektronového mikroskopu s analyzátozem chemického složení. Elektronový mikroskop pracuje na principu svazku urychlených elektronů, které dopadají na vzorek, jímž buď prochází (TEM), nebo jsou pohlceny a budí signály (SEM – skenovací elektronový mikroskop). Hlavní výhodou této techniky je velmi vysoké rozlišení a velká hloubka ostrosti. Díky velké hloubce ostrosti, lze výrazně lépe zkoumat tvary a povrchy, které jsou členité (například dutiny, řediny, lomové plochy, apod.). Pro detekci jednotlivých prvků je SEM vybaven energiově disperzním analyzátozem, který hodnotí charakteristické Roentgenovo záření. Tento přístroj měří atomární složení v místě dopadu svazku s přesností 0,1 hm%. Je možné měřit v bodě, na linii nebo plošně a tedy vytvořit tzv. chemickou mapu.

Vzorek 200D1:

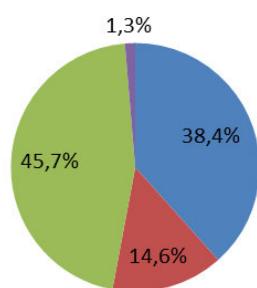
Na tomto vzorku bylo z 6 útvarů vybráno celkem 6 plošných oblastí (obr. 46). V každé z těchto označených oblastí, bylo provedeno měření obsahu prvků pomocí EDS. Naměřené hodnoty obsahu jednotlivých prvků v hmotnostních a objemových procentech a jejich grafické znázornění jsou zaznamenány v příloze 3.



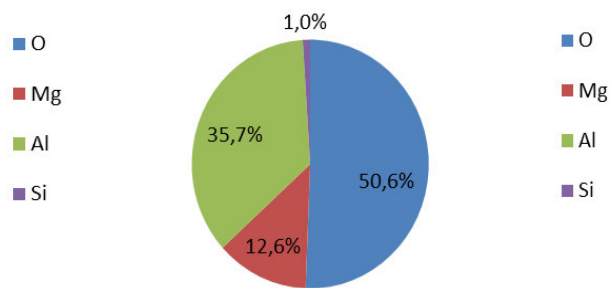
Obr. 46: Oblasti pro analýzu EDS – vzorek 200D1 [22]

Z výsledků měření chemického složení jednotlivých vměstků pomocí EDS je patrné, že nedochází k významnému kolísání obsahu prvků. Zdá se, že nečistoty jsou po chemické stránce homogenní. Dle výsledků určení složení je zřejmé, že se pravděpodobně jedná o směsný oxid Al_2O_3 a MgO , tedy spinel. Někdy se tento oxid označuje jako MgAl_2O_4 . Průměrné obsahy prvků jsou znázorněny na obr. 47. Naměřené hodnoty a grafické znázornění obsahů prvků jsou zaznamenány v příloze 3.

Průměrné chemické složení vměstků - hmotnostní %

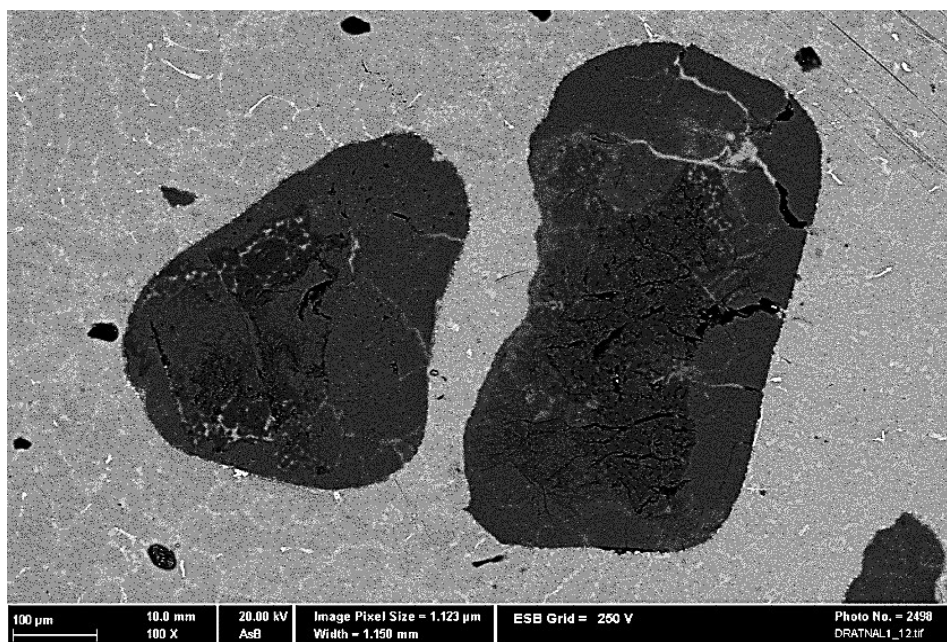


Průměrné chemické složení vměstků - atomová %

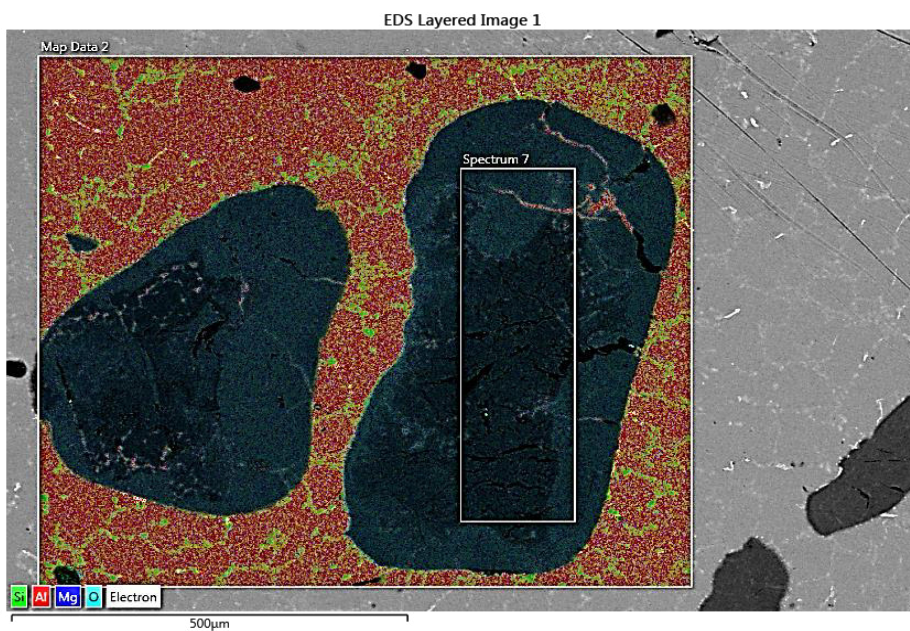


Obr. 47: Průměrné chemické složení vměstků - SEM

Na obr. 48 je morfologie vměstků, které mají zřejmě hladký povrch, oblé tvary a velikosti 300 – 500 μm . Uvnitř útvarů se vyskytují póry, do těla vměstku prorůstá základní materiál a složení je pravděpodobně nehomogenní. Na tomto vzorku bylo ve vybrané oblasti provedeno EDS mapování, jak je vidět na obr. 49.

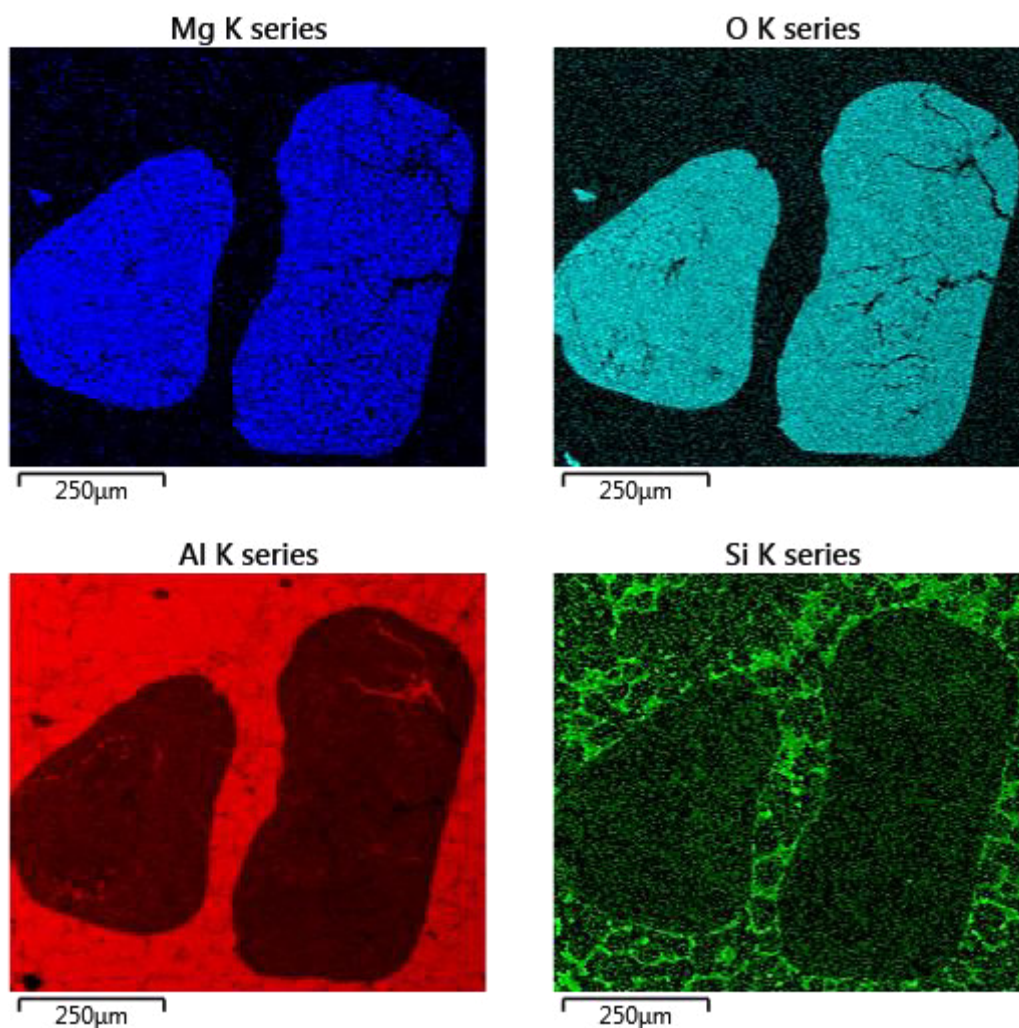


Obr. 48: Morfologie vměstků – SEM [22]



Obr. 49: Oblast pro EDS mapování [22]

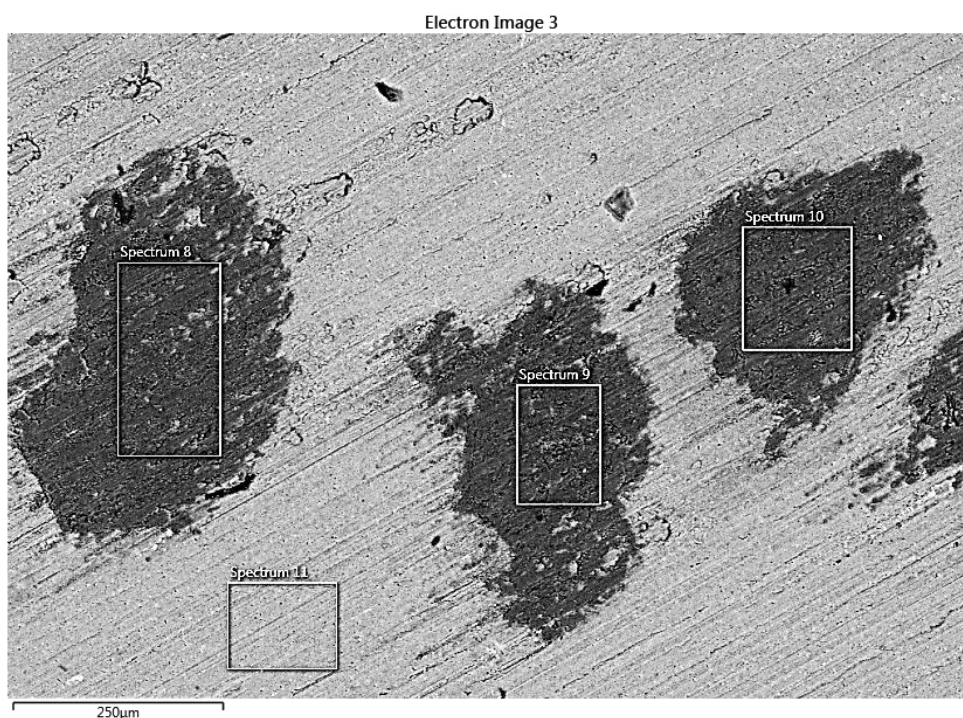
Mapováním je možné pozorovat rozložení prvků jako kyslík, hořčík, křemík a hliník. Z obr. 50 je patrné, že vměstky jsou bohaté na hořčík a kyslík a že rozložení v celém průřezu vměstku je rovnoměrné. Na rozhraní vměstku a základního materiálu je jasná ostrá hranice. Vměstek je tedy kompaktní a pravděpodobně byl v kovu přítomný již v tekuté fázi. Chemické složení mapované oblasti a oblasti uvnitř vměstku vytyčené na obr. 49 je zaznamenáno v příloze 3.



Obr. 50: Rozložení prvků v oblasti vměstku [22]

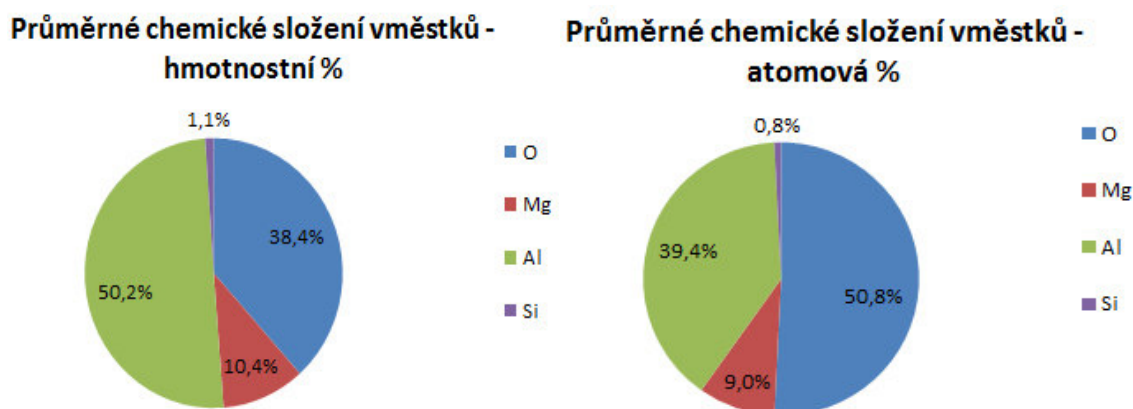
Vzorek 200D2:

Na tomto vzorku byly ze 3 útvarů vybrány celkem 3 plošné oblasti, jak je vidět na obr. 51. Tento vzorek nebyl před analýzou broušen ani leštěn. Pro určení chemického složení není nutné, aby byl vzorek vyleštěný. V každé z těchto označených oblastí bylo provedeno měření obsahu prvků pomocí EDS. Naměřené hodnoty obsahu jednotlivých prvků v hmotnostních a objemových procentech a jejich grafické znázornění jsou zaznamenány v příloze 3.



Obr. 51: Oblasti pro analýzu EDS – vzorek 200D2 [22]

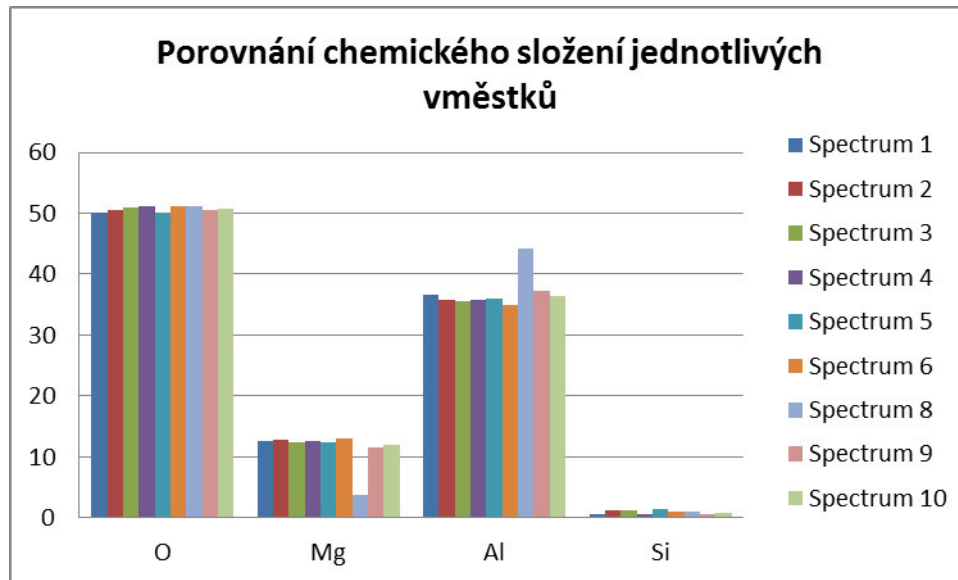
Průměrné chemické složení vměstků ze vzorku 200D2 je zobrazeno na obr. 52. Průměrný obsah kyslíku je 50,8 atomových %, průměrný obsah hořčíku je 9 atomových procent, průměrný obsah hliníku je 39,4 atomových procent a průměrný obsah křemíku je 0,8 atomových procent. Z výsledného složení vyplývá, že vměstky jsou pravděpodobně složeny ze spinelů $MgAl_2O_4$. Naměřené hodnoty jsou v příloze 3.



Obr. 52: Průměrné chemické složení vměstků – SEM

Na obr. 53 je porovnání všech měření chemického složení devíti vměstků ze vzorků 200D1 a 200D2. Z grafu je patrné, že chemické složení všech měřených vměstků je téměř totožné. V případě měření Spektra 8 ze vzorku 200D2 byl změřen významně

nižší obsah hořčíku a naopak vyšší obsah hliníku. Nabízí se vysvětlení, že v tomto vměstku existuje vyšší podíl Al_2O_3 na úkor MgO . Obsah kyslíku však není v porovnání s ostatními vměstky tak markantně rozdílný.



Obr. 53: Porovnání chemického složení jednotlivých vměstků – SEM

3.5.6 Čistota taveniny v udržovacích pecích – K-mold

K-mold test slouží k rychlému určení čistoty kovu v makroměřítku. Účelem experimentu je posoudit rozdíly množství zkoumaných nečistot v určitých výrobních fázích udržování taveniny. Udržovací pece slouží pro akumulaci tekutého kovu a díky výbavě rotorového zařízení i k odplynění. Popis typu a uspořádání pecí je podrobněji v kapitole 3.5.1.

Udržovací pece pracují dávkově, tedy množství slitiny se v průběhu odlévání významně mění. Na základě toho bylo určeno, že čistota taveniny bude zkoumána ve 3 stádiích plnění pece:

1. stádium - pec je naplněná, právě po cyklu odplynění a stažení stěrů, pec je připravená na první odběr slitiny lící lžící, dále značeno zkratkou ODPL
2. stádium - lící lžice odebrala poslední možnou dávku slitiny a v peci zůstává tzv. tekutý zbytek, další nabírání kovu není kvůli omezeným pohybovým možnostem průmyslového robota možné, dále značeno zkratkou ZB
3. stádium - pec byla doplněna z transportní pánve, čili před spuštěním odplynění, dále v textu značeno zkratkou DOL

Ve 3 zmíněných stádiích byly odlity zkušební vzorky do K-mold. Metoda K-mold je blíže popsána v kapitole 2.3.5. Experiment byl proveden na třech udržovacích pecích

(KP2, KP3, KP4). Z každé z těchto udržovacích pecí bylo odlito v každém ze tří stádií 5 vzorků v K-formě (Tabulka 5).

Pro doplňkovou informaci byly odlity vzorky pro určení naplynění metodou dvojího vážení a vzorky pro spektrální analýzu. K-mold byla před odběrem vzorků vždy předehřata na hodnotu přibližně 200 °C. Nejprve byla kokila K-mold vystavena na 10 minut sálavému teplu udržovací pece a následně byl předehřev dokončen nalitím několika dávek taveniny. Kokila byla před experimentem za tepla opatřena ochranným nástřikem Cillolin AL 2812 GA. Sada vzorků z K-mold z jedné pece je k nahlédnutí na obr. 54.



Obr. 54: Vzorky K-forma, udržovací pec KP4, odlité z tekutého zbytku

Po rozlomení vzorků z K-mold byla vizuálně posouzena přítomnost vměstků. Postup posouzení lomových ploch je podrobně popsán v kapitole 2.3.5. Výsledky pozorování lomových ploch jsou znázorněny v tabulce 5. Rozlámáním jednoho vzorku se získají 4 posuzované lomové plochy. Hodnota byla přiřazována na základě přítomnosti vměstků na lomových plochách, dle následujícího pravidla:

- vměstek na 1 lomové ploše – hodnota 1
- vměstek na 2 lomových plochách – hodnota 2
- vměstek na 3 lomových plochách – hodnota 3
- vměstek na 4 lomových plochách – hodnota 4

Po posouzení lomů byla určena K-mold hodnota, jak je popsáno v kapitole 2.3.5. Vzhled lomových ploch vzorku KP3-DOL-E je na obr. 59.

Tabulka 5: Zkoušky čistoty taveniny (K-mold hodnoty)

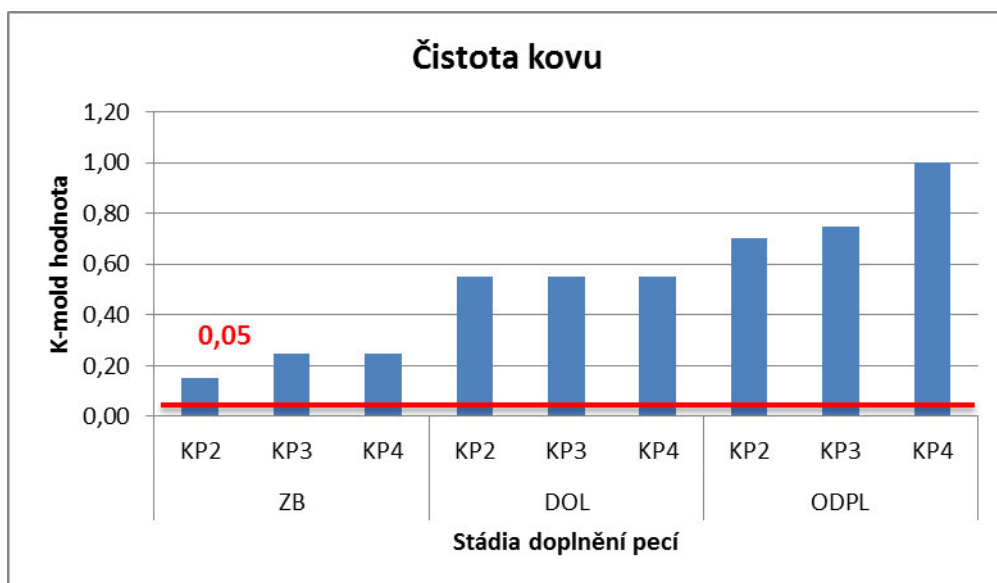
Vzorek	ZB			DOL			ODPL		
	KP2	KP3	KP4	KP2	KP3	KP4	KP2	KP3	KP4
A	0	1	0	1	2	1	2	4	4
B	1	1	2	2	1	3	3	2	4
C	0	1	1	2	3	3	4	2	4
D	2	1	1	4	1	2	1	4	4
E	0	1	1	2	4	2	4	3	4
Suma	3	5	5	11	11	11	14	15	20
K-mold hodnota	0,15	0,25	0,25	0,55	0,55	0,55	0,70	0,75	1,00

Vzhledem k životnosti kelímku přibližně 9 měsíců byl předpoklad takový, že v tekutém zbytku se budou hromadit nečistoty. Kelímek pece KP2 byl používán necelé 3 měsíce, kelímek pece KP3 byl používán 2 měsíce a kelímek pece KP4 byl v provozu již necelých 9 měsíců.

Z obr. 55 je patrné, že nejvyšší čistota kovu se prokázala právě v tekutém zbytku. Hodnota k-mold dosahovala v tekutém zbytku přibližně hodnoty 0,2. Větší podíl nečistot se projevil v kovu po dolití kelímku, hodnota k-mold dosahovala hodnoty 0,55. Nejvyšší počet nečistot, byl v kovu zjištěn po odplynění a odstranění stěrů, k-mold zde nabývala hodnot až 1,0. Experimentem bylo dokázáno, že během různých fází plnění pece se hodnota k-mold zvýšila až 5×. Větší podíl nečistot se projevil v kovu po dolití kelímku. Nejvyšší počet nečistot, byl v kovu nalezen až po odplynění a odstranění stěrů.

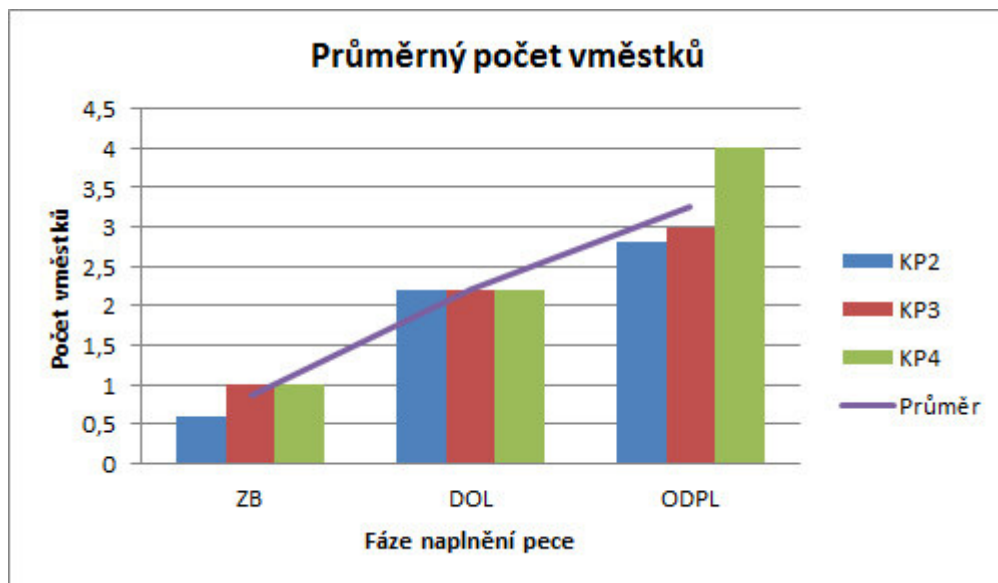
Volba kritické K-mold hodnoty závisí především na druhu výroby. Čím nižší je hodnota K-mold, tím vyšší je čistota kovu. Kritickou K-mold hodnotu lze určit na základě tloušťky stěn odlitku. Pro odlitky s tenkými stěnami s vysokými požadavky na těsnost, může být hodnota zvolena velmi nízká, např. 0,05. U odlitků s masivní tloušťkou stěn, mají nečistoty menší negativní vliv na těsnost a může být tedy zvolena vyšší kritická hodnota. [23]

Obr. 55 zobrazuje vyhodnocení čistoty kovu pomocí K-mold hodnoty. Za předpokladu, že maximální dovolená K-mold hodnota byla zvolena 0,05 to znamená, že jeden vzorek z 20 by byl znečištěný. V daném experimentu požadované čistotě nevyhovuje žádný stav taveniny v udržovací peci. Z hlediska stáří kelímků, je z obr. 55 patrné, že kelímek v peci KP4 má nižší čistotu kovu než kelímky KP2 a KP3.



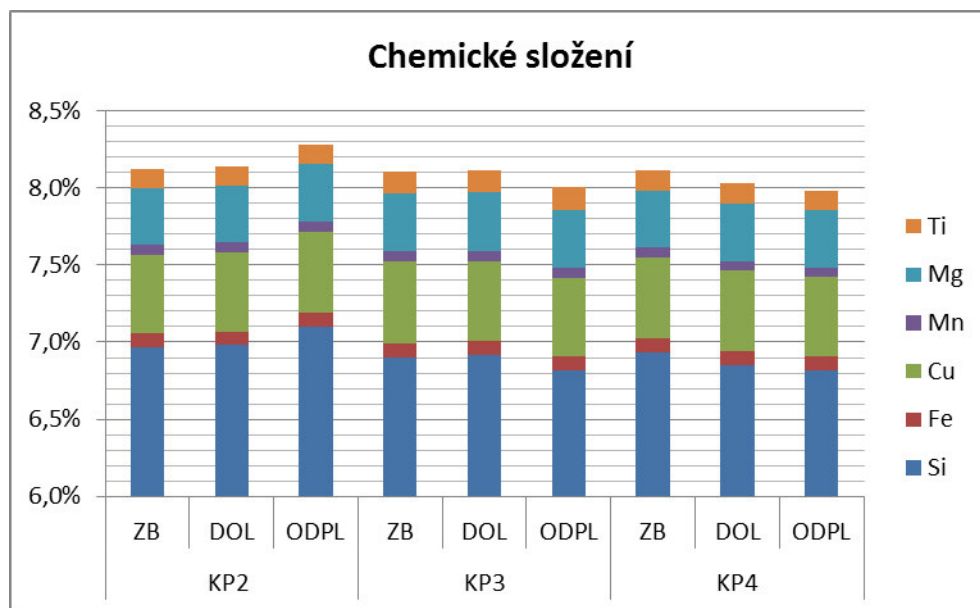
Obr. 55: Čistota kovu v jednotlivých pecích při různých fázích naplnění pece

Na grafu na obr. 56 můžeme vidět průměrnou čistotu kovu v různých fázích naplnění různých kelímků. Ze vzniklé závislosti vyplývá, že K-mold hodnota se po doplnění kelímku zvyšuje. Jedná se o očekávané chování, jelikož doléváním nového kovu dochází k víření a míchání kovu v kelímku. Zároveň kov, který je do udržovací pece dolován, není rafinován, předpokládá se tedy přítomnost nečistot. Po cyklu odplynění je vidět další významné zhoršení čistoty. Při odplynění rotorovým zařízením by mělo docházet k rafinaci, tedy čištění kovu. Možným důvodem přítomnosti nečistot po rafinaci je nedokonalé odstranění stěrů.



Obr. 56: Průměrný počet vměstků v jednotlivých pecích při stupni naplnění

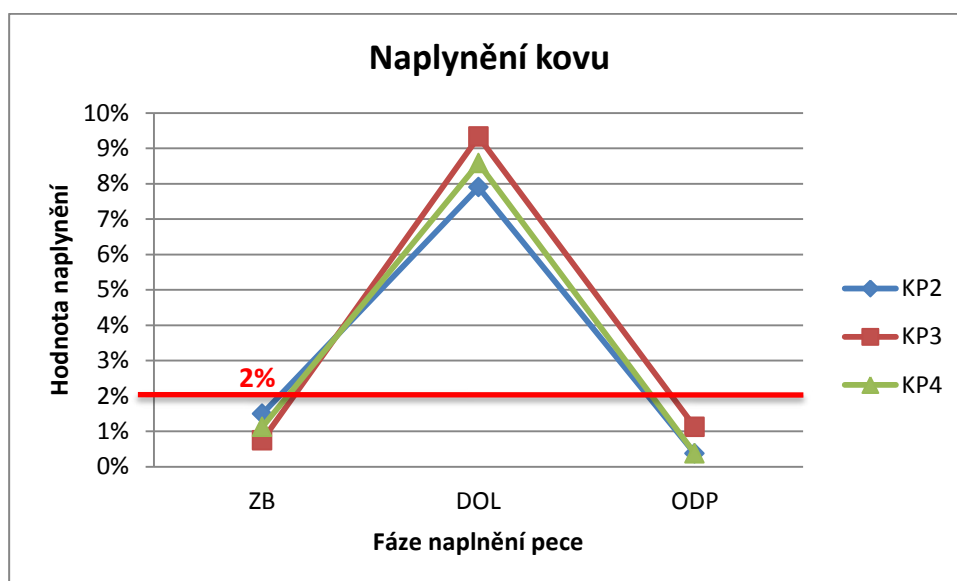
Ve všech kelímcích byla provedena spektrální analýza ve všech fázích plnění pece. Z obr. 57 je zřejmé, že v kovu nejsou registrovány žádné významné změny obsahu prvků. Malé rozdíly obsahů mezi třemi fázemi jsou způsobeny efektem míchání při dolévání nové dávky kovu a také rotorovým zařízením, které má schopnost promíchávat taveninu.



Obr. 57: Chemické složení kovu v jednotlivých pecích při stupni naplnění

Odebírání taveniny pro odlití vzorků se provádí z hladiny, experiment tedy popisuje čistotu taveniny v blízkosti hladiny. V experimentu se hovoří o tzv. tekutém zbytku v kelímku pece, nicméně v tomto případě jde o zbytek o hmotnosti kolem 900 kg. Množství zbytku je dáno pohybovými možnostmi licího robota, který kvůli své vyvýšené poloze nad pecí, nemůže licí lžící více zanořit do kelímku. Vzhledem k velkému množství tekutého zbytku, je možné, že nečistoty pomalu sedimentují až ke dnu a nejsou dále nabrány licí lžící. Rotorové odplynovací zařízení je však vybaveno grafitovým rotorem s efektem pumpování taveniny z níže položených míst kelímku, tento jev může způsobovat opětovné zamíchávání nečistot, které již sedimentovaly.

Byla provedena analýza naplynění taveniny ve všech kelímcích a všech fázích plnění. Z určení hodnot naplynění taveniny z obr. 58 je zřejmé, jak výrazně se kov při tavení nasytí vodíkem. Mezi vzorky ztuhlými ve vakuu při 80 mbar a na vzduchu je velký rozdíl v hustotách. Hodnota *dichte indexu* se přibližuje až 10%. Jak je vidět, tekutý zbytek nevykazuje známky velkého naplynění. Po odplynění se hodnota *dichte indexu* pohybuje kolem 1%. Maximální dovolená hodnota naplynění je 2%. Některé další naměřené hodnoty jsou k nahlédnutí v příloze 4.



Obr. 58: Naplynění kovu v jednotlivých pecích při stupni naplnění

Na obr. 59 jsou zobrazeny lomové plochy vzorku KP3-DOL-E. Z obrázku je patrné, že v tomto případě se jedná o silně znečištěný vzorek, s výrazně viditelnými vměstkami. Takové nečistoty mohou mít v tenkých stěnách odlitku velmi negativní vliv, zejména na těsnost.



Obr. 59: Vzhled lomových ploch vzorku KP3-DOL-E [zdroj: vlastní]

Nečistoty, jako na obr. 59 se v kovu objevují i po rafinaci kovu. Bubliny dusíku zjevně nedostatečně napomáhají vyplouvání nečistot. Jedna z možných příčin je vyšší hustota nečistot, než je hustota samotné taveniny. Z předchozích analýz složení a měření tvrdosti je pravděpodobné, že se jedná o spinel. Teoretická hustota Al_2O_3 je $3,97 \text{ g/cm}^3$ a teoretická hustota MgO je $3,59 \text{ g/cm}^3$. Ze zkoumaných fotografií ze světelného a

elektronového mikroskopu se ale ukázalo, že vměstky jsou nehomogenní a v některých případech prorostlé základním materiálem. Skutečné hustoty nečistot se tedy budou mírně lišit. Hustota slitiny je však přibližně $2,7 \text{ g/cm}^3$. To činí rozdíl hustot přibližně 25%. Hustota tedy figuruje ve prospěch sedimentace nečistot. Kromě hustoty má na schopnost a rychlost vyplouvání především velikost a tvar vměstku, velikost bublin a množství bublin.

3.5.7 Čistota taveniny v udržovacích pecích – metoda Vmet

Ve spolupráci se společností Foseco Foundry R&D – Pittsburgh byla provedena analýza vzorků kovu odlitých z udržovacích pecí do K-mold. Vzorky byly odlity za požadovaných podmínek odborníkem ze jmenované společnosti. Následně byla polovina vzorků odeslána do laboratoře v Pittsburghu na analýzu Vmet. Druhá polovina vzorků byla zanechána jako záložní. Metoda Vmet je popsána v kapitole 2.3.8. Výsledný report z laboratoře je k nahlédnutí v příloze 5.

Ze dvou udržovacích pecí KP1 a KP3 bylo odlito celkem 6 vzorků do K-mold. Vzorek z tekutého zbytku, po dolití pece a po odplynění. Popis vzorků je v tabulce 6 a náhled vzorků na obr. 60.

Tabulka 6: Popis vzorků K-mold

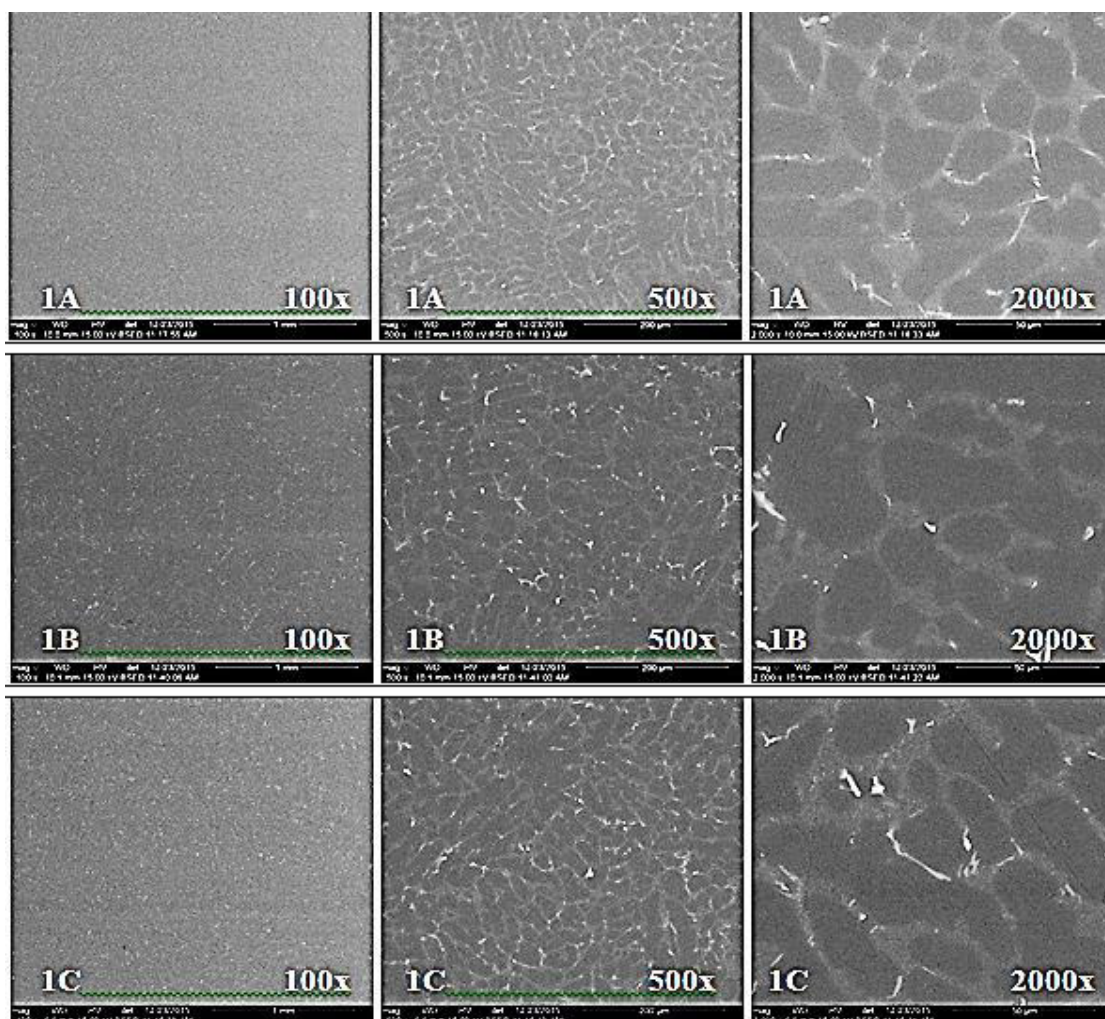
Vzorek	Fáze doplnění pece	Zpracování
1A	Tekutý zbytek	None
1B	Po dolití	
1C	Po odplynění	FDU, 18min XSR220, 30l/min
2A	Tekutý zbytek	None
2B	Po dolití	
2C	Po odplynění	FDU, 18min XSR220, 30l/min



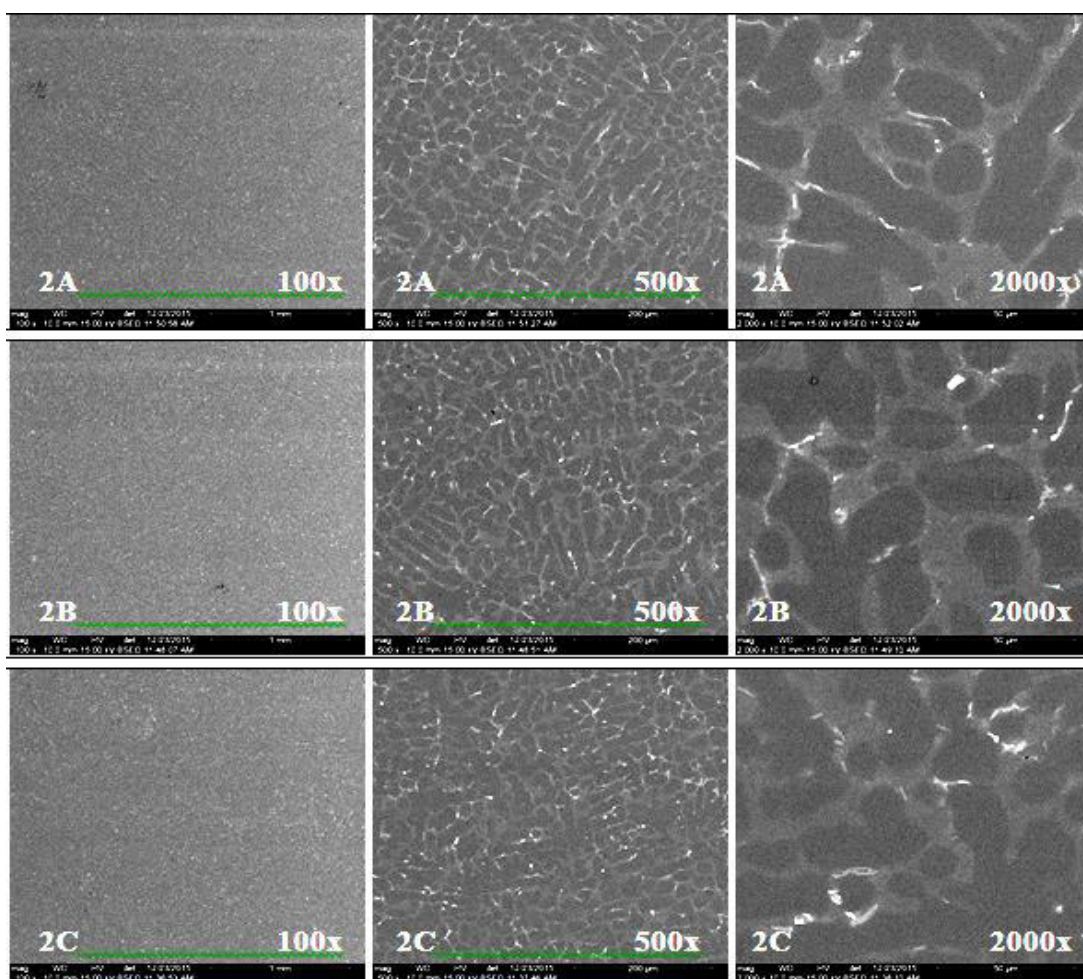
Obr. 60: Vzorky odlité do K-mold

Vzorky byly v laboratoři rozřezány a zalisovány do plastické hmoty, dále byly vybroušeny brusným papírem o drsnosti $220 \mu\text{m}$, vyleštěny pomocí suspenzí $9 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$ a 400 nm . Vzorky byly nadále připraveny pro analýzu.

Na každém vzorku byly pořízeny snímky se zvětšením 100x, 500x a 2000x (obr. 61 a obr. 62).



Obr. 61: Snímky vyleštěných vzorků z K-mold s narůstajícím zvětšením, pec KP3 - SEM



Obr. 62: Snímky vyleštěných vzorků z K-mold s narůstajícím zvětšením, pec KP1 - SEM

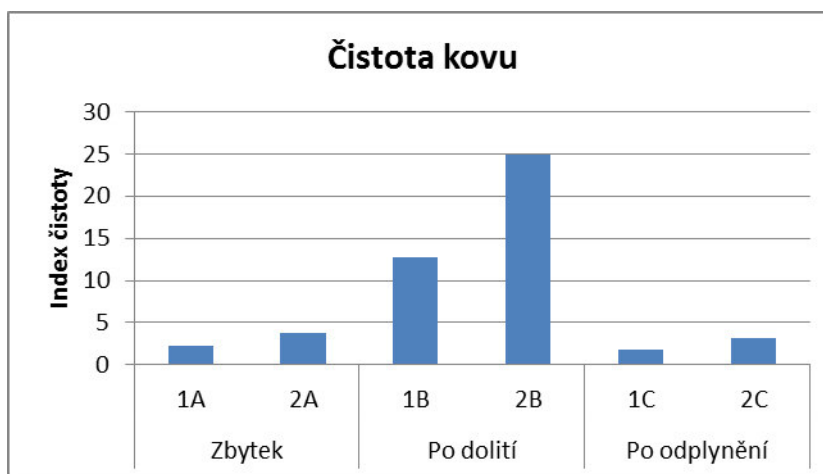
V tabulce 7 jsou výsledky Vmet analýzy z 6 analyzovaných vzorků. Metoda díky speciálně odladěnému softwaru určuje celkový počet nálezů na určené ploše. Dále nálezy roztřídí dle chemického složení, zda se jedná o poretitu, strusku či oxidy Al + Mg. Nálezy jsou roztříděny i podle jejich velikostí do skupin.

Z výsledků této analýzy vyplývá, že tekutý zbytek má velmi dobrou čistotu. Po dolití kovu do udržovací pece značně narůstá počet vměstků a pórů. Po odplynění rotorovým zařízením je opět dosaženo velmi dobré čistoty jako v případě tekutého zbytku. Vzhledem k velkému množství kovu v kelímku, se při odběru vzorků nepovedlo zachytit taveninu s nekovovými vměstků větších rozměrů (0,1 – 0,9mm), které jsou zkoumány v předešlých experimentech. Dle tabulky 7 jsou maximální rozměry nalezených vměstků do 75 μm .

Tabulka 7: Výsledky analýzy Vmet

Vzorek	1A	1B	1C	2A	2B	2C
Index čistoty	2.3	12.8	1.8	3.7	24.9	3.2
Nálezy celkem	62	629	45	221	998	139
Plocha (mm ²)	100.44	100.44	100.44	100.44	100.44	100.44
<i>Složení</i>						
Póry	48	469	40	160	683	103
Struska	7	87	1	18	87	8
Oxidy Al + Mg	7	73	4	43	228	28
<i>Dle velikosti</i>						
0.50 – 2.50 µm	15	163	3	74	228	33
2.50 – 5.00 µm	23	332	22	115	456	68
5.00 – 15.0 µm	21	131	18	30	306	37
15.0 – 30.0 µm	3	1	2	2	8	1
30.0 – 75.0 µm	0	2	0	0	0	0
> 75.0 µm	0	0	0	0	0	0

Z tabulky 7 a obr. 63 vyplývá, že v rámci velikostí nečistot a pórů do 75 µm, je odplyňování rotorovým zařízením s rotorem XSR220 vhodným nástrojem nejen na samotné odplynění, ale i na zvýšení čistoty kovu.



Obr. 63: Čistota kovu dle Vmet analýzy

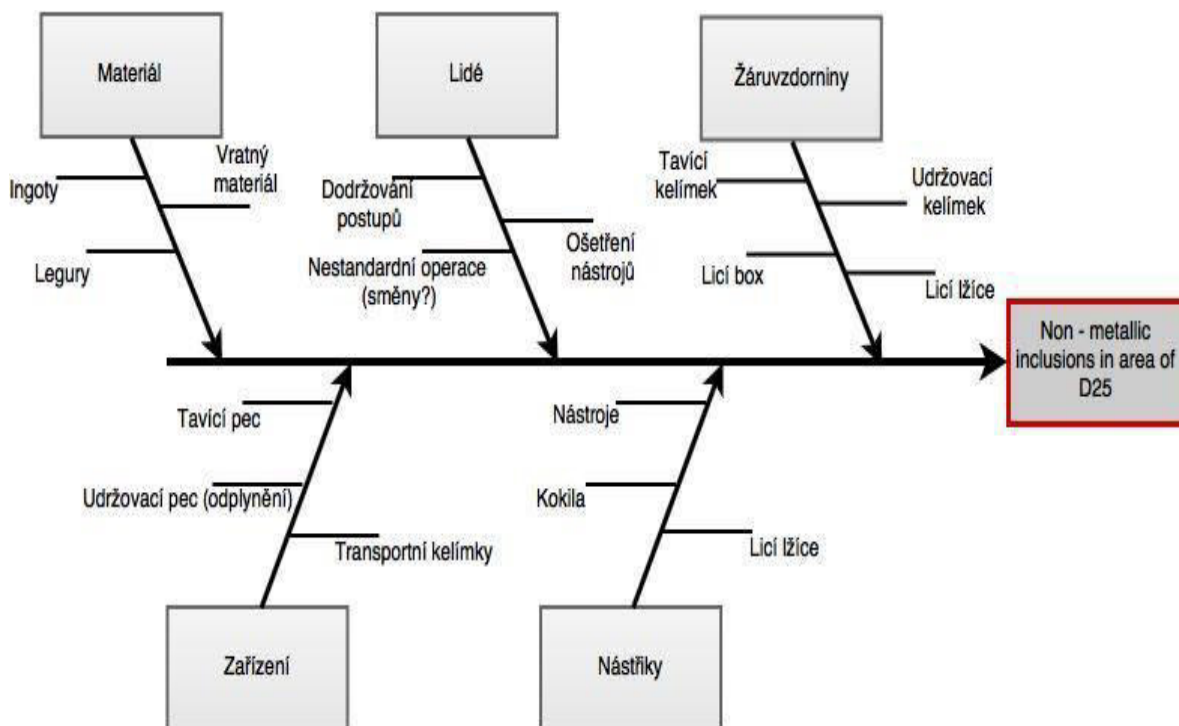
Porovnání metod Vmet a K-mold

Při porovnání výsledků metody Vmet a K-mold lze dojít k závěru, že obě metody dávají informace o čistotě kovu. Výhodou metody Vmet jsou komplexní informace nejen o čistotě, ale také o složení a velikosti jednotlivých vměstků. Jedná se tak o velmi komplexní metodu, která se hodí především při řešení dlouhodobě neshodných odlitků. Nevýhodou Vmet jsou vysoké náklady na její uskutečnění, které mohou prodražovat výrobu.

Metoda K-mold podává informace pouze o samotné čistotě vměstků. Nedokáže určit bližší složení ani velikost vměstků. Výhodou této metody je jednoduchost provedení a minimální náklady na provedení. Tato metoda je velmi vhodná pro průběžnou kontrolu jakosti taveniny. K-mold se používá pro tvorbu vzorků pro metodu Vmet.

3.6 Návrhy na odstranění vměstků

Pro identifikaci místa vzniku vměstků je důležité identifikovat všechny faktory, které mohou vznik vměstku způsobit. Pro vznik kvalitních odlitků s dobrými mechanickými vlastnostmi a s dobrou těsností, jsou důležité samotné výrobní podmínky. A to nejen ty, které jsou dány technickými předpisy, ale především ty podmínky, které jsou reálně v průběhu výrobního procesu zajištěny. Je důležité zhodnotit také lidský faktor. Pro identifikaci možných příčin výskytu vměstků byl vytvořen Ishikawův diagram, který graficky znázorňuje možné příčiny výskytu vady (obr. 64).



Obr. 64: Ishikawův diagram příčin a následků [Zdroj: vlastní]

Z Ishikawova diagramu je zřejmé, že příčina výskytu nekovových vměstků je multifaktoriální. Přítomnost nečistot v hutních ingotech je vzhledem k objemu kovu velmi obtížně detekovatelná a je možné ji prokázat jen velmi složitě. Žárovzdorniny se kterými přichází kov do styku, neobsahují žádné podobné materiály, ze kterých by se uvolňovaly zkoumané vměstky. Používané nástřiky a nátěry také neobsahují žádné komponenty, z kterých by mohly vznikat zkoumané nekovové vměstky. V případě lidského faktoru, je nutné se zaměřit na dodržování předepsaných postupů nakládání s taveninou.

3.6.1 Filtrace kovu

Pro odstranění nekovových nečistot z taveniny se nabízí možnost slitinu filtrovat. Jak je popsáno v kapitole 2.4.2, existuje několik způsobů filtrace. Pro účinnou a realizovatelnou filtraci je nutná správná volba typu a velikosti filtru. Dále má vliv načasování neboli zařazení filtrace do výrobního procesu. Často využívané řešení je vložení filtru do vtokové soustavy formy. V určeném místě vtokové soustavy se vyfrézuje kapsa pro vložení filtru a filtr se před každým zavřením formy vloží. Filtr zachycuje nečistoty a zároveň zklidňuje plnění dutiny formy. V daném případě pro produkt AJ200D není možné užít filtrace ve vtokové soustavě, protože technologie *ROTACAST*[®] nedisponuje vtokovou soustavou. Odlévání je prováděno přeléváním taveniny z licího boxu rovnou do dutiny formy. Filtr není možné vhodně umístit.

Další možností je tedy kov filtrovat v předchozích výrobních krocích. Taková možnost se nabízí, když je kov přeléván z transportní pánve do udržovací pece. Vzhledem k množství kovu v transportní pánvi, které se pohybuje kolem 800 kg, byl firmou Lanik s.r.o. doporučen filtr *Vukopor*[®] A (obr. 65) o rozměrech minimálně 150x150 mm s tloušťkou 25 mm a pórovitostí 10 ppi. Filtr by byl jednorázový, tedy po jednom doplnění udržovací pece by byl vyjmut a nahrazen filtrem novým.



Obr. 65: Filtry typu Vukopor [17]

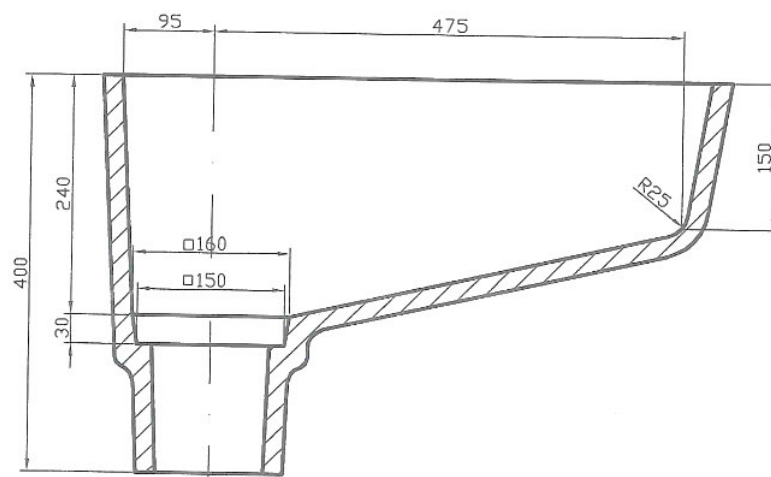
Tento filtr nelze kvůli rozměrům vložit do používaného licího žlabu, který je zobrazen na obr. 21. K tomuto filtru byl doporučen sibalový vyztužený vtokový kůl (obr. 66). Vtokový kůl je nutné umístit tak, aby bylo možné jeho vyjímání či odklápění. Vtokový kůl by bylo vhodné před každým doléváním pece očistit od usazenin kovu a nečistot. Filtr by byl před doléváním udržovací pece z transportní pánve vložen do sibalového kůlu. Pro následné vyjmutí filtru z vtokového kůlu po ukončení dolévání pece, je důležité zajistit možnost vyjmutí použitého filtru jednoduchým způsobem. Nabízí se jednoduché řešení podvléknout drát pod filtr a pro vyjmutí zatáhnout za oba konce. Funkčnost je nutné experimentálně vyzkoušet. V případě ocelového drátu se očekává jeho rozpouštění v hliníkové tavenině, z tohoto důvodu by bylo vhodné použít jiný materiál, například nerezový bez obsahu železa. Roli bude hrát i průřez použitého drátu.

Takto navržená soustava umožňuje filtrovat kov v předchozích krocích před odléváním kovu do formy a je tak řešením zabránění výskytu nekovových inkluzí v odlitku.

Tento návrh má však zásadní komplikaci s proveditelností. Prostor pro doplňování kovu do udržovacích pecí je přibližně 2,5 m nad zemí. Z toho vyplývá, že při dolévání pece by bylo potřeba minimálně dvou kvalifikovaných osob. Pracovník, který ovládá vysokozdvíhací vozík s transportní pánví, nedohlédne na horní okraj pece, kde dolévání probíhá. Na plošině nad udržovací pecí musí být tedy druhý pracovník, který navádí pracovníka ve vysokozdvíhacím vozíku. Bezpečnost operace tedy závisí na jejich spolupráci a zkušenosti. V případě, že by došlo během přelévání k ucpaní filtru, mohlo by následovat přelítí vtokového kůlu. Při přelítí taveniny mimo plnicí soustavu by hrozil požár či pracovní úraz. Vyvýšené uložení pecí představuje bezpečnostní riziko.

V průběhu řešení této práce byla vybudována nová výrobní linka, u které jsou udržovací pece uloženy pod úroveň podlahy slévárny. Tato konstrukční úprava přináší výhody pro pracovníky, kteří při doplňování pecí z transportní pánve vidí do prostoru doplňování. Není tedy třeba dvou pracovníků a jejich spolupráce. Návrh filtrace při doplnění těchto pecí nepřináší zvýšená rizika při zanesení filtru a omezení jeho průtočnosti. Výše uvedený návrh je vhodný pro implementaci na této nové výrobní lince.

Po zavedení filtrace kovu by bylo vhodné průběžně kontrolovat, zda se čistota kovu mění. Jednoduchým způsobem by bylo možné kontinuálně vyhodnocovat čistotu pomocí K-mold.



Obr. 66: Sibalovský vtokový kůl

3.6.2 Zlepšení přípravy kovu

V průběhu přípravy tekutého kovu pro odlití se provádí několik zásahů, které jsou ovlivňovány lidským faktorem. Zaměstnanci tavního jsou povinni se řídit předpisy a musí být řádně proškoleni. Během experimentálního pozorování procesu výroby bylo odhaleno, že v některých případech není dodrženo postupů pro nakládání s taveninou.

Na začátku výroby, kde probíhá vsázení ingotů, nálitků či neshodných odlitků je nutné dbát na čistotu vsázeného materiálu. Pokud je to možné, je vhodné nálitky a odlitky očistit od kovových pilin a jiných nečistot.

Po roztavení by mělo následovat pečlivé odebrání stěrů z hladiny. Při pozorování odstraňování stěrů z hladiny v tavní peci bylo v některých případech nedostatečné nebo zcela zanedbané. Některé nástroje nebyly řádně ošetřeny nátěry. Před transportem kovu do udržovacích pecí, je nutné pánev vždy přehřát na požadovanou teplotu. Po nalití kovu do udržovací pece je vhodné provést stažení stěrů a následně začít cyklus odplynění. Po odplynění se opět provede odebrání stěrů. Vždy je vhodné použití nástrojů ošetřených ochranným nátěrem.

V některých případech dochází k odstávce z důvodů náhlých oprav nebo výměn forem. Odstávky mohou trvat více než 24 hodin. Po tuto dobu jsou udržovací pece naplněné a odplyněné. V této době získávají nečistoty prostor pro flotaci a sedimentaci vlivem rozdílných hustot s kovem. Proto je vhodné před začátkem odlévání opět očistit hladinu od stěrů, pro zamezení vniknutí nečistot do odlitku.

V celém procesu manipulace a přípravy tekutého kovu, je nutné pro operátory připravit důkladně vypracované školení a vizuální podpory pro nakládání s taveninou. Další úlohou je zajištění kontroly, zda operátoři byli korektně proškoleni a zda kroky manipulace s taveninou korektně dodržují.

Důsledkem pozorování dodržování předpisů pro tavní byl do kolektivu zaměstnanců tavní infiltrován zaměstnanec, jehož hlavním úkolem je dohled na dodržení předpisů pro nakládání s taveninou.

4 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat vady v podobě nekovových vměstků v hliníkových odlitcích hlav spalovacích motorů a navrhnout řešení odstranění této vady.

K analýze nekovových vměstků bylo z výroby vyčleněno několik kusů odlitků, na kterých byla vada detekována. Z těchto odlitků bylo pro další experimenty vybráno 7 odlitků, které byly rozřezány a použity pro experimenty.

V rámci praktické části této práce byly z několika vyřiznutých částí z odlitků pořízeny výbrusy, které byly zkoumány na optickém světelném a skenovacím elektronovém mikroskopu. Dále bylo provedeno měření tvrdosti nekovových částic při nízkém zatížení. Na zařízení SEM bylo pomocí analyzátoru určeno chemické složení vměstků a rozložení prvků uvnitř částic. Dále proběhl experiment, který ukazuje na čistotu taveniny v udržovacích pecích ve třech stádiích udržování. Byla využita technologie K-mold. Čistota taveniny v udržovacích pecích byla také posouzena metodou Vmet za asistence odborných pracovníků společnosti Foseco Foundry R&D – Pittsburgh. Byl vytvořen diagram příčin a následků, který zahrnuje vlivy a souvislosti se vznikem vady.

Mikroskopie nekovových vměstků ukázala, že se jedná o oxidické vměstky o velikostech 0,2 – 1 mm. Vměstky jsou nehomogenní a prorostlé základním materiálem. Měřením tvrdosti bylo zjištěno, že by se mohlo jednat o směsný oxid $MgO \cdot Al_2O_3$. Měření chemického složení na SEM prokázalo, že částice jsou složeny z kyslíku, hořčíku, hliníku a křemíku. Prvky jsou v částicích rozloženy rovnoměrně. Na základě výsledků analýz bylo potvrzeno, že se jedná o spinel.

Ze třech udržovacích pecí byly odebírány vzorky taveniny a odlévány do K-mold. Vzorky byly odebrány ve třech stádiích plnění pecí: z tekutého zbytku, po doplnění pece a po odplynění. Výsledky posuzování rozlámaných vzorků z K-mold ukazují, že vměstky o velikostech až 1 mm jsou v kovu přítomny i po odplynění. Stejně vzorky byly pořízeny i pro laboratoř společnosti Foseco, která pomocí multifunkční metody Vmet, posoudila čistotu kovu. Dle výsledků reportu laboratoře Foseco Foundry R&D – Pittsburgh je po odplynění rotorem XSR220 snížen počet malých vměstků do velikosti 75 μ m.

Návrhem pro odstranění výrobní vady typu oxidických vměstků je zvolena filtrace kovu. Vzhledem k technologii odlévání ROTACAST[®] není možné kov filtrovat při odlévání. Návrh spočívá ve filtraci kovu při plnění udržovací pece. Tento způsob u dosavadně používaných udržovacích pecí není z konstrukčních a z bezpečnostních důvodů možný. Během tvorby této diplomové práce byla spuštěna nová výrobní linka, u které by bylo možné zakomponovat filtraci při doplňování udržovacích pecí do standardních výrobních postupů.

Kromě analýzy vady, tedy nekovových vměstků, byla snaha se zákazníkem vyřešit závažnost této vady. Vzhledem k tomu, že vměstky jsou přítomny vždy v takové části odlitku, kde nemají negativní vliv na funkci, byla tato vada zákazníkem uznána za neškodnou. Nicméně pokud by nečistoty byly přítomny v místech tenkých stěn, mohly by mít negativní vliv na testy těsnosti. Pokud by se tedy vada vyskytla v kritických místech odlitku, tato práce může být použita jako podklad pro další analýzu a experimenty.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [2] MICHNA, Š. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700s. ISBN 80-890-4188-4.
- [3] GUO, J. F.. *Use of the ultrasonic technique in measuring inclusions in Al-Si alloy melts*. 2007.
- [4] DJURDJEVIC, M. B. , ODANOVIĆ Z. , PAVLOVIĆ-KRSTIĆ, J. *Melt quality control at aluminum casting plants* [online]. Association of Metallurgical Engineers of Serbia, 2010 [cit. 2015-11-09]. Dostupné z WWW: <http://metalurgija.org.rs/mjom/Vol16/No1/6_Djurdjevic_MJoM_1601.pdf>.
- [5] Aluminum melt cleanliness performance evaluation using PoDFA (Porous Disk Filtration Apparatus) technology. *Scientific Bulletin* [online]. 2009 [cit. 2015-11-09]. ISSN 1454-2331. Dostupné z WWW: <http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full6739.pdf>.
- [6] ENRIGHT, P. G. , HUGHES, I. R. , Pickering, J. *Characterisation of molten metal quality using the pressure filtration technique* [online]. 2015-11-16, **2003** [cit. 2015-11-16]. Dostupné z WWW: <<https://library.e.abb.com/public/d6d22d7550b631dd8525761800538bc0/Characterisation%20of%20Molten%20Quality.pdf>>.
- [7] GÖRNER, H. *Removal of dissolved elements in aluminium by filtration* [online]. Trondheim, 2009 [cit. 2015-11-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:326596/FULLTEXT01.pdf>>. Doctor thesis. Norwegian University of Science and Technology.
- [8] MARTIN, J. P. , PAINEHAUD, F. On-Line Metal Cleanliness Determination in Molten Aluminum Alloys Using the LiMCA II Analyzer. *Light metals* [online]. 1994, : 915-920 [cit. 2015-11-12]. ISSN 1543-1851.
- [9] ABB Measurement & Analytics - Measurement made easy. ABB [online]. [cit. 2015-11-12]. Dostupné z WWW: <<http://new.abb.com/products/measurement-products>>.
- [10] KITAOKA, S. Evaluation of the melt cleanliness by K mold test, Light Metals 2001, 40th Annual Conference of Metallurgists of CIM (COM 2001), August 26-29, 2001, Toronto, Ontario, pp.13-24 (ISBN 1-894475-12-7).
- [11] NEFF, D. V. *Improving Die Casting Melt Quality and Casting Results with Melt Quality Analysis and Filtration* [online]. Solon, Ohio, 2015-11-16 [cit. 2015-11-16]. Dostupné z WWW: <<https://www.dykast.com/user/products/5689-pdfs-1-file.pdf>>.
- [12] SUŠKOVÁ, S. , LUŇÁK M. *Změna kvality slitin hliníku v závislosti na délce přítomnosti v udržovací peci*. Česká slévárenská společnost. Brno, 2015. ISBN 978-80-02-02619-8.
- [13] *Produktový katalog MK* [online]. [cit. 2015-11-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.sebestasro.cz/cz/get.php?id=72>>.

- [14] VRTÍLEK, J. *Metody měření znečištění taveniny* [online]. In: . 2009, 2015-11-17 [cit. 2015-11-17]. ISBN 978 - 80 - 02 - 02148 - 3. Dostupné z WWW: <http://www.rgu.cz/download/holecek2009/11_prednaska.pdf>.
- [15] KENDRICK, R., CAREIL P., FREYN M. MeltMap Audit - Assessing metal quality in aluminium foundries. *Foundry practise* [online]. 2015-11-25, **2015**(264): 17-21 [cit. 2015-11-25]. Dostupné z WWW: <http://www.foseco.com/fileadmin/GIFA2015/foundry_practice/FP_264-e.pdf>.
- [16] SHI, W. *Vmet analyzis of cast aluminum alloys, fundamental, application and statistical analyses*. Foseco research. Pittsburgh, 2015.
- [17] LÁNÍK, B. , TOMEK, L.. *Filtry, filtrace a filtrování-Příručka* [online]. In: . LANIK s.r.o. [cit. 2015-12-07]. Dostupné z WWW: <www.lanik.eu>.
- [18] *Foseco* [online]. 2015 [cit. 2015-12-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.foseco-at-gifa.com/en/highlights-2015/aluminium-foundry/metal-treatment-for-aluminium-foundries/>>.
- [19] *Aluminium low-pressure wheel production – end to end solutions* [online]. [cit. 2015-12-02]. Dostupné z WWW: <http://www.foseco-at-gifa.com/fileadmin/GIFA2015/foundry_practice/FP_264_wheels-e.pdf>.
- [20] FOSECO. Vyzdívky pánví INSURAL ATL v podniku NEMAK CZ. *Slévárenství* [online]. **2008**(7-8): 360-361 [cit. 2015-12-10]. ISSN 0037-6825.
- [21] *Hindenlang Giessereitechnik* [online]. [cit. 2016-01-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.hindenlang.de/produkte/ofenrundtisch-duo/>>.
- [22] Vlastní – snímky pořízeny na SEM v laboratoři VUT FSI Ústav materiálových věd a inženýrství
- [23] Evaluation of aluminum melt quality with K-mold fracture test. *Dykast* [online]. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z WWW: <<https://www.dykast.com/user/products/3159-pdfs-1-file.pdf>>.
- [24] LANIK s.r.o. – firemní produktový katalog

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/symbol	Jednotka	Význam
PoDFA	-	Porous Disc Filtration Apparatus
LAIS	-	Liquid Aluminum Inclusion Sampling
LiMCA	-	Liquid Metal Cleanless Analyzer
K	-	K-mold hodnota
S	-	Počet lomů s nalezeným vměstkem
n	-	Počet lomů
I	-	Index čistoty
Si	mm ²	Plocha inkluzí
S	mm ²	Celková plocha
EDS	-	Energiově disperzní spektrometr
FDU	-	Foundry degassing unit
MTS	-	Metal treatment station
SEM	-	Skenovací elektronový mikroskop
HV	-	Tvrdost podle Vickerse
TEM	-	Transmisní elektronový mikroskop
v	m/s	Rychlost
r	M	Poloměr částice
g	m/s ⁻²	Tíhové zrychlení
ρ	kg/m ³	Hustota
η	m ² /s	Kinematická viskozita
DI	%	Dichte index

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Rovnovážný diagram Al-Si [2]	9
Obr. 2: Ingoty hliníkové slitiny AlSi7MgCu0,5 firmy Slovalco [zdroj: vlastní]	10
Obr. 3: Princip filtrace cezením [17]	13
Obr. 4: Filtrační koláč [17]	13
Obr. 5: Víření taveniny ve struktuře filtru [17]	14
Obr. 6: Princip rotoru FDU [19]	15
Obr. 7: Princip metody PoDFA [5]	16
Obr. 8: Prefil test – plnění a průběh zkoušky [6]	17
Obr. 9: Prefil – po ukončení zkoušky [6]	17
Obr. 10: Princip zařízení LAIS [3]	18
Obr. 11: Princip metody LiMCA [9]	19
Obr. 12: K-mold [11]	20
Obr. 13: Vzhled lomových ploch [4]	20
Obr. 14: Vlevo vzorek Straube-Pfeiffer, vpravo Drosstest [14]	21
Obr. 15: Princip ultrazvukové detekce vměstků [3]	22
Obr. 16: Pozice vměstku (vlevo), tvar vměstku (vpravo) [16]	23
Obr. 17: Určení chemického složení vměstku [16]	23
Obr. 18: Tavicí plynové kelímkové pece Realistic [zdroj: vlastní]	25
Obr. 19: Teploty termočlánků v tavicí peci [zdroj: vlastní]	26
Obr. 20: Předehřev pánve [zdroj: vlastní]	26
Obr. 21: Přelévací žlab [zdroj: vlastní]	27
Obr. 22: Otočný stůl se dvěma kelímkovými udržovacími pecemi [21]	27
Obr. 23: Udržovací pece Hindenlang [zdroj: vlastní]	28
Obr. 24: Odplyňovací rotorové zařízení Hindenlang [21]	29
Obr. 25: Odplyňování taveniny [zdroj: vlastní]	29
Obr. 26: Oblast vměstků [zdroj: vlastní]	31
Obr. 27: Postižené části odlitku [zdroj: vlastní]	32
Obr. 28: Přímkové uspořádání vměstků [zdroj: vlastní]	32
Obr. 29: Vyleštěná část odlitku [zdroj: vlastní]	33
Obr. 30: Rozložení vměstků v horizontálním směru po broušení [zdroj: vlastní]	34
Obr. 31: Rozložení vměstků ve vertikálním směru po broušení [zdroj: vlastní]	34
Obr. 32: Ve vertikálním směru po leštění – optický mikroskop [zdroj: vlastní]	35
Obr. 33: V horizontálním směru po leštění – optický mikroskop [zdroj: vlastní]	35
Obr. 34: Uspořádání vměstků – SEM	37
Obr. 35: Uspořádání vměstků – SEM (prachové částice na povrchu)	38
Obr. 36: Morfologie vměstků – SEM	38
Obr. 37: Morfologie vměstku – SEM	39
Obr. 38: Uspořádání a velikosti vměstků – světelný mikroskop [zdroj: vlastní]	40
Obr. 39: Uspořádání a velikosti vměstků - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]	40
Obr. 40: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]	41

Obr. 41: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]	41
Obr. 42: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]	42
Obr. 43: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]	43
Obr. 44: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]	44
Obr. 45: Detail vměstku - světelný mikroskop [zdroj: vlastní]	44
Obr. 46: Oblasti pro analýzu EDS – vzorek 200D1 [22]	45
Obr. 47: Průměrné chemické složení vměstků - SEM.....	46
Obr. 48: Morfologie vměstků – SEM [22]	46
Obr. 49: Oblast pro EDS mapování [22]	47
Obr. 50: Rozložení prvků v oblasti vměstku [22]	48
Obr. 51: Oblasti pro analýzu EDS – vzorek 200D2 [22]	49
Obr. 52: Průměrné chemické složení vměstků – SEM.....	49
Obr. 53: Porovnání chemického složení jednotlivých vměstků – SEM.....	50
Obr. 54: Vzorky K-forma, udržovací pec KP4, odlité z tekutého zbytku	51
Obr. 55: Čistota kovu v jednotlivých pecích při různých fázích naplnění	52
Obr. 56: Průměrný počet vměstků v jednotlivých pecích při stupni naplnění	53
Obr. 57: Chemické složení kovu v jednotlivých pecích při stupni naplnění.....	54
Obr. 58: Naplynění kovu v jednotlivých pecích při stupni naplnění.....	55
Obr. 59: Vzhled lomových ploch vzorku KP3-DOL-E [zdroj: vlastní]	55
Obr. 60: Vzorky odlité do K-mold	56
Obr. 61: Snímky vyleštěných vzorků z K-mold s narůstajícím zvětšením, pec KP3 - SEM	57
Obr. 62: Snímky vyleštěných vzorků z K-mold s narůstajícím zvětšením, pec KP1 - SEM	58
Obr. 63: Čistota kovu dle Vmet analýzy	59
Obr. 64: Ishikawův diagram příčin a následků [Zdroj: vlastní]	60
Obr. 65: Filtry typu Vukopor [17]	61
Obr. 66: Sibalový vtokový kůl	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vstupní složení ingotů.....	24
Tabulka 2: Výrobní složení slitiny	24
Tabulka 3: Rozřazení testovaných vzorků dle použitých metod.....	33
Tabulka 4: Hodnoty tvrdosti HV 0,3 [22]	36
Tabulka 5: Zkoušky čistoty taveniny (K-mold hodnoty)	51
Tabulka 6: Popis vzorků K-mold.....	56
Tabulka 7: Výsledky analýzy Vmet	59

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Měření tvrdosti nekovových vměstků

Příloha 2: Snímky z elektronového a světelného mikroskopu

Příloha 3: Analýza chemického složení vměstků - SEM

Příloha 4: Čistota taveniny v udržovacích pecích

Příloha 5: Protokol z měření metodou Vmet