



Metalurgie slitin hliníku pro vysokotlaké lití

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Kryštof Stieber**
Vedoucí práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kryštof Stieber**

Osobní číslo: **S13000181**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Metalurgie slitin hliníku pro vysokotlaké lití**

Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se slitinami hliníku používanými ve slévárenské praxi.
2. Prostudujte metalurgii slitin hliníku, zaměřte se na metalurgické ošetření - rafinaci a odplynění.
3. Na základě spolupráce s firmou KSM Castings CZ a.s. proveďte experimenty zaměřené na sledování metalurgické čistoty taveniny.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

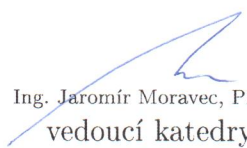
- [1] **ROUČKA, J.** *Metalurgie neželezných kovů [skripta]. Akademické nakladatelství Cerm, Brno, 2004.*
[2] **MICHNA, Š. et al.** *Encyklopedie hliníku. 1. vyd., Prešov 2005.*
[3] **RAGAN, E. a kol.** *Liatie kovov pod tlakom, 1. vyd., Prešov, 2007.*
[4] **VALECKÝ, J. a kol.** *Lití kovů pod tlakem. 1.vyd., Praha, 1963.*
[5] **Časopisy: Slévárenství, Giesserei, atd.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Iva Nováková, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. ledna 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Děkuji Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za vedení a cenné rady při vypracování bakalářské práce. Dále patří poděkování Ing. Jiřímu Crhovi za ochotu a pomoc při realizaci experimentů. Nemalé poděkování patří firmě KSM Castings CZ a.s. za poskytnuté informace.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá hodnocením metalurgické čistoty taveniny slitiny AlSi8Cu3. Teoretická část práce se věnuje vlastnostem hliníku a jeho slévárenských slitin, způsobům ošetření taveniny a provozním zkouškám kontroly její metalurgické čistoty. Experimentální část práce vznikla ve spolupráci s firmou KSM Castings CZ a zabývá se sledováním vlivu doby odplynování na naplynění taveniny, resp. hodnoty Dichte indexu taveniny.

Klíčová slova

vysokotlaké lití, FDU, odplynování, rafinace, Drosstest, index hustoty, siluminy, vodík, vměstky

Abstract

The bachelor thesis concerns with the evaluation of metallurgical purity of the melt for the alloy AlSi8Cu3. The theoretical part of the thesis inquires into properties of aluminium and aluminium foundry alloys, methods of treatment of the melt and operating methods of quality control of metallurgical purity of the melt. The experimental part was created in collaboration with KSM Castings CZ and deals with monitoring of the depending time degassing on the gassing of the melt or value of Density index of the melt.

Key words

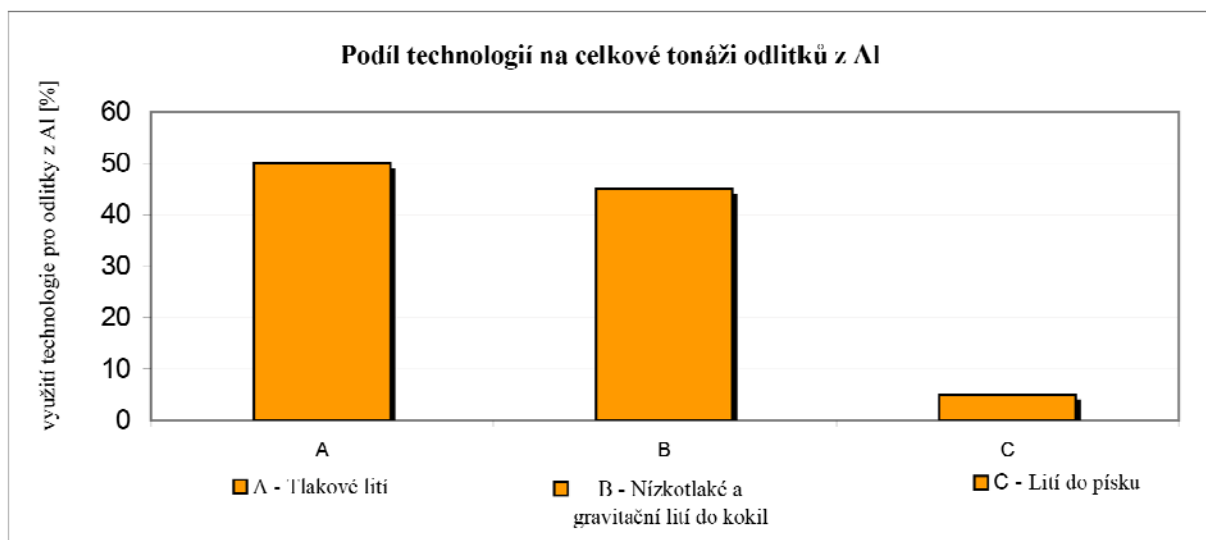
high pressure die casting, FDU, degassing, refining, Drosstest, Density index, silumin, hydrogen, impurity

1.	ÚVOD.....	7
2.	TEORETICKÁ ČÁST.....	8
2.1.	Hliník a jeho slévárenské slitiny.....	8
2.2.	Metalurgie slitin hliníku.....	12
2.2.1.	Tavení.....	12
2.2.2.	Vznik vměstků.....	13
2.2.3.	Naplynění taveniny.....	15
2.2.4.	Rafinace a odplyňování taveniny.....	18
2.2.5.	Provozní kontrola metalurgické čistoty taveniny.....	19
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	24
3.1.	Příprava taveniny.....	24
3.2.	Hodnocení kvality vstupního materiálu.....	26
3.3.	Hodnocení vlivu doby odplyňování na kvalitu taveniny.....	32
4.	ZÁVĚR.....	35
5.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY.....	37

1. ÚVOD

Vysokotlaké lití je technologie, která má využití při odlévání velkých sérií konstrukčně složitých, tenkostěnných odlitků. Její podstata spočívá v plnění dutiny formy vysokou rychlostí. Tavenina v dutině formy tuhne za působení vysokého tlaku. Touto technologií lze dosáhnout vysoké rozměrové přesnosti, velmi dobré kvality povrchu a jemnozrné struktury, čímž se zlepšují mechanické vlastnosti odlitku.

Počátky technologie tlakového lití se datují do druhé poloviny 19. století, kdy se využívalo lití na strojích s teplou komorou. Na vývoji tlakového lití na strojích se studenou vertikální komorou má velký podíl Ing. Josef Polák, který tuto technologii patentoval v roce 1929. Byl zároveň prvním výrobcem strojů pro tento způsob tlakového lití. V poválečné době zaznamenalo lití pod tlakem rychlý rozvoj, přičemž i dnes je trend výroby tuto technologií rostoucí. [5] [8] [10] Jak ukazuje graf na obr. 1-1, v dnešní době se touto technologií vyrobí asi polovina všech hliníkových odlitků a to zejména pro automobilový průmysl, kde odlitky z Al tvoří cca 10 % tonáže automobilu. [10] Bloky motorů ze slitin hliníku jsou ze 60 % lity tlakově. [14]



Obr. 1-1 Porovnání nejpoužívanějších způsobů lití odlitků z Al [10]

S rozvojem této technologie v posledních desetiletích je také spojen růst požadavků na kvalitu odlitků i na efektivitu výroby. Kvalitu odlitků ovlivňuje mnoho faktorů. Jedním z nich je metalurgické ošetření taveniny, zejména rafinace a odplyňování. Touto problematikou se zabývá i předložená bakalářská práce, která vznikla ve spolupráci se slévárnou odlitků pro tlakové lití KSM Castings CZ a.s. v Hrádku nad Nisou. Cílem této práce je vyhodnocení kvality taveniny, tj. množství vměstků a naplynění taveniny, s ohledem na dobu odplyňování.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Hliník a jeho slévárenské slitiny

Hliník je v zemské kůře vázán např. v bauxitu, kryolitu, korundu, spinelech, kaolinu atd. Průmyslová výroba hliníku byla započata na konci 19. století, kdy byla objevena metoda elektrolýzy roztoku oxidu hlinitého, která se používá dodnes. Výrobou z primárních surovin se dosahuje čistoty hliníku až 99,9 %. Výroba je velmi energeticky náročná, na 1t hliníku je potřeba asi 20 GJ tepelné energie a 14 MWh elektrické energie. [10]

Hliník krystalizuje v kubické plošně centrované soustavě. Díky tomu má dobré plastické vlastnosti např. tažnost. Přehled vlastností hliníku je uveden v tab. 2.1. Čistý Al má nízkou pevnost a proto se pro konstrukční účely využívá více ve formě slitin.

Tab. 2.1 Vlastnosti hliníku [8] [10]

Krystalická mřížka	FCC
Mřížková konstanta a [m]	$4,05 \cdot 10^{-10}$
Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	2700
Pevnost [MPa]	80
Tažnost [%]	40
Tvrdość [HB]	20
Modul pružnosti [MPa]	72000
Bod tavení [$^{\circ}\text{C}$]	660
Elektrická vodivost [$\text{m} \cdot \Omega^{-1}$]	34
Tvářitelnost za tepla	velmi dobrá
Tvářitelnost za studena	velmi dobrá
Slévateľnost	omezená
Svařitelnost	dobrá
Odolnost proti korozi	velmi dobrá

Nárůst výroby odlitků ze slitin hliníku patří mezi největší v rámci oboru slévárenství díky kombinaci svých mechanických, technologických a chemických vlastností. Mezi hlavní výhody slitin hliníku patří odolnost proti korozi, dobrá obrobiteľnost a výborná slévateľnost. Nevýhodou je silný sklon k oxidaci, absorpce plynů v tekutém stavu a schopnost rozpouštět železo. Lineární smrštění odlitků ze slitin hliníku se udává v rozmezí 0,8-1,5 %. Z hlediska zpracování tekutého kovu je výhodné, dochází-li k tuhnutí při jedné teplotě. U slitin s velkým rozdílem teplot likvidu a solidu dochází k tvorbě trhlin, mají horší zabíhavost a větší sklon k naplynění. Proto se nejčastěji používají slitiny blízké eutektickému složení. [2] [5] [8]

Každá slitina obsahuje základní prvek (Al), hlavní a vedlejší přísadové a doprovodné prvky. Hlavní přísadový prvek tvoří druhý největší podíl ve slitině. Má rozhodující vliv na parametry slitiny. Doprovodné prvky jsou nechtěné, do taveniny se dostanou ze vsázky nebo při tavení z nářadí

a vyzdívek pecí. Protože při jejich vyšší koncentraci zhoršují kvalitu materiálu, je snaha jejich množství omezit na minimum. Přípustný podíl je pro daný prvek dán normou. [10]

V ČR se značení slitin hliníku řídí evropskou normou ČSN EN 1706 nebo často německou normou DIN 1725. Dle evropské normy se slitina značí EN AC-XXXXX. Jednotlivé číslice (X) mají následující význam:

1. číslice - přísadový prvek (2 - Cu, 4 - Si, 5 - Mg, 7 - Zn),
2. číslice je skupina slitin,
3. číslice je pořadové číslo ve skupině,
4. a 5. číslice jsou 0.

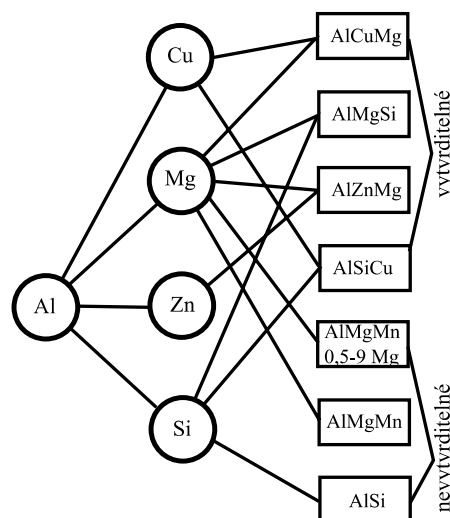
Značení skupiny slitin např. AlSi9Cu je EN-AC46XXX, kde znaky X jsou určeny pro konkrétní slitinu. [10]

Tato norma umožňuje i značení chemickými značkami, např. skupina slitin AlSi9Cu má označení EN AC-Al Si9(7,11)Cu3(2,1). Pořadí přísadových prvků je od hlavního přes vedlejší sestupně dle obsahu. Je-li obsah prvku nižší než 1%, procento se neuvádí. [10]

Slévárenské slitiny hliníku se dělí do základních skupin:

- duraly Al-Cu,
- hydronaly Al-Mg,
- siluminy Al-Si.

Vzhledem k objemu výroby odlitků zejména ze slitin Al-Si bude o těchto slitinách pojednáno podrobněji. Především slitiny typu Al-Si-Cu tvoří přibližně 50 % celkové produkce hliníkových odlitků. Mezi méně používané se řadí slitiny hliníku s hlavním přísadovým prvkem zinkem. Typy nejčastěji používaných slitin ve slévárenství zachycuje schéma na obr. 2-1. Slitiny lité pod tlakem se obvykle používají v tepelně nezpracovaném stavu, některé typy však mají sklon k samovytvrdování. [6] [10]



Obr. 2-1 Slitiny hliníku [6]

Duraly se řadí k vysokopevným slitinám hliníku. Vyznačují se vysokou tažností, vynikající obrobiteľnosť, ale nízkou odolnosť proti korozi. Výhodou je vysoká pevnost a možnosť vytvrzení,

díky špatným slévárenským vlastnostem bývají nahrazovány siluminy. Duraly se používají pro gravitační lití do písku, do kokil i do skořepin. Odlitky se používají tam, kde jsou vysoké nároky na pevnost (převodové skříně) nebo nároky pro práci za vyšších teplot (turbíny, hlavy válců). [10] [12]

Hydronaly se kvůli horším slévárenským vlastnostem a velkému sklonu k naplynění využívají jen v omezené míře. To je dáno velkým intervalem tuhnutí již při menším obsahu hořčíku. Vyznačují se velmi dobrou odolností proti mořské vodě a výbornou obrobiteľností. Lijí se gravitačně do písku i do kokil. Slitiny s vyšším obsahem Mg (okolo 9 %) se odlévají tlakově. Odlitky se využívají jako dekorativní předměty, optické přístroje apod. Mechanické vlastnosti nejpoužívanějších slitin Al-Mg a Al-Cu jsou uvedeny v tab. 2.2. [10] [12]

Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti slitin Al-Cu a Al-Mg [10]

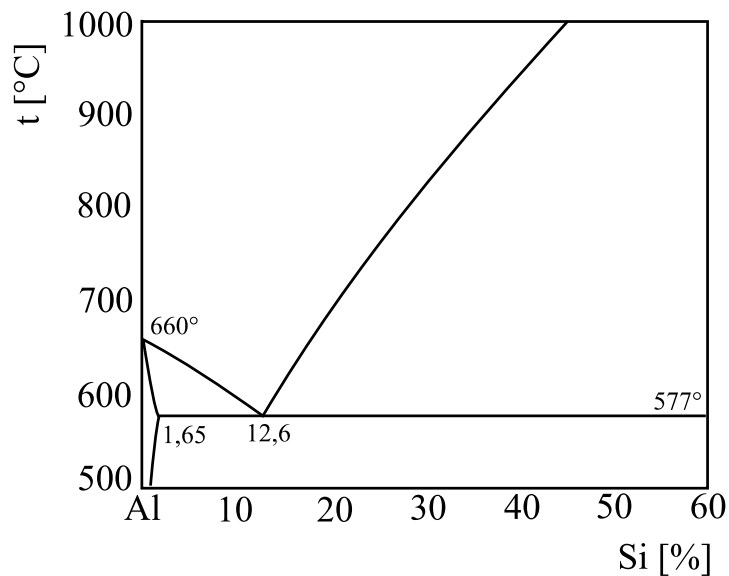
označení slitiny			stav slitiny	R _m [MPa]	A ₅₀ [%]	HBS	použití	
VDS	číselné	chemické						
	EN AC-21000	EN AC-AlCu4MgTi	kovová forma	T4	320	8	95	slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi
	EN AC-21100	EN AC-AlCu4Ti		T6	330	7	95	slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi
				T64	320	8	90	
242	EN AC-51000	EN AC-AlMg3		L	150	5	50	slitiny pro speciální použití
244	EN AC-51300	EN AC-AlMg5		L	180	4	60	slitiny pro speciální použití
349	EN AC-51200	EN AC-AlMg9		200	1	70	slitiny pro lití pod tlakem	

Slitiny Al-Si neboli **siluminy** jsou binární slitiny, krystalizující podle fázového diagramu znázorněného na obr. 2-2. Křemík se v tuhém stavu (20 °C) v hliníku téměř nerozpouští, pouze 0,16 %. Při eutektické teplotě 577 °C vzroste rozpustnost až na 1,65%. Křemík u všech typů slitin Al-Si zvyšuje zabíhavost a pevnost. Vliv křemíku na další vlastnosti je uveden v tab. 2.3. Siluminy se užívají jak pro gravitační lití do písku a do kokil, tak i pro tlakové lití. [10]

Dle obsahu křemíku se siluminy dělí na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Podeutektické slitiny obsahují většinový podíl tuhého roztoku α(Al) a 4,5-10 % Si. Eutektické slitiny mají obsah 10-13 % Si. Eutektická koncentrace je při 11,7 % Si. Obrobiteľnost těchto slitin je špatná, protože základní matrice je měkká. Nadeutektické slitiny obsahují nejvyšší % podíl Si. Vyšší koncentrace křemíku snižuje trvanlivost nástrojů. [5] [6]

Tab. 2.3 Vliv obsahu Si na vlastnosti siluminů [10]

tepelná roztažnost	snižuje
korozní odolnost	zvyšuje
odolnost proti otěru	zvyšuje
sklon ke vzniku trhlin a prasklin	snižuje
stahování a sklon ke vzniku mikrostaženin	snižuje
zabíhavost	zlepšuje



Obr. 2-2 Binární diagram Al-Si [10]

Ve 30. letech 20.stol. byly vyvinuty slitiny na bázi Al-Si-Cu. Měď jako vedlejší přísadový prvek (s obsahem do 5 %) umožňuje tyto slitiny vytvrzovat, protože tvoří intermetalickou fázi CuAl_2 . Pro tlakové lití tvoří velkou část produkce zejména v automobilovém průmyslu slitina AlSi8Cu3 . Tato slitina se používá v tepelně nezpracovaném stavu. Může ale vlivem rychlého ochlazování dojít k samovytvrzení, což záleží na množství přesyceného tuhého roztoku α ve slitině. Měď u těchto slitin snižuje odolnost proti korozi. [10]

Vytvrzování se využívá také u slitin Al-Si-Mg, kde fází umožňující vytvrzení je Mg_2Si . [6]

Tab. 2.4 Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti slitiny Al-Si [5]

prvek	hlavní vlastnosti
B	zjemnění struktury
Cu	zvýšení pevnosti vytvrzováním (fáze CuAl_2), snižuje odolnost proti korozi
Co	omezuje vliv Fe změnou morfologie β fáze z jehlicovité na koulovitou
Fe	snížení mechanických vlastností
Mg	zvýšení pevnosti vytvrzováním (fáze Mg_2Si)
Mn	omezuje vliv Fe tvorbou intermetalických fází s Fe
P	použití jako modifikační prvek pro nadeutektické siluminů
Sr	modifikace Si
Ti	tvoří intermetalické fáze s B a Al s cílem zjemnění struktury

Vliv některých dalších prvků na vlastnosti slitin ukazuje tab. 2.4. Téměř vždy obsahuje slitina určitý podíl železa, které snižuje odolnost proti korozi, snižuje mechanické vlastnosti a vytváří škodlivé intermetalické fáze. Přípustný podíl Fe stanovuje norma. U slitin pro tlakové lití bývá vyšší než u lití do písku (asi 1 % Fe), protože zabraňuje lepení taveniny na líc formy. Vliv Fe se eliminuje manganem. Železo tvoří několik intermetalických fází: [8] [10]

- β -AlFeSi má tvar tenkých desek, které na výbrusu mají tvar jehlic. β -fáze krystalizuje v monoklinické mřížce. Stechiometrický vzorec je Al_5FeSi . Negativní vliv β -fáze na mechanické vlastnosti je výrazně větší než u α -fáze.
- α -AlFeMnSi vzniká díky legování manganem a krystalizuje v hexagonální mřížce. Na výbrusech lze α -fázi rozpoznat dle tvaru tzv. čínského písma. Stechiometrický vzorec je $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$.

Mangan se do siluminů přidává za účelem zamezení vzniku škodlivé β -fáze. Namísto toho vzniká méně škodlivá kompaktní α -fáze. Aby eliminace vlivu železa byla účinná, měl by být obsah manganu asi poloviční oproti obsahu železa. Vlastní fáze mangan netvoří. [10]

Mechanické vlastnosti tlakově litých slitin bez tepelného zpracování ukazuje tab. 2.5:

Tab. 2.5 Mechanické vlastnosti slitin Al litých pod tlakem[10]

označení slitiny			R_m [MPa]	A_{50} [%]	HBS
VDS	číselné	chemické			
239 D	EN AC-43400	EN AC-AlSi10Mg(Fe)	240	1	70
230 D	EN AC-44300	EN AC-AlSi12(Fe)	240	1	60
226 D	EN AC-46000	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)	240	<1	80
226/3	EN AC-46500	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)(Zn)	240	<1	80
231 D	EN AC-47100	EN AC-AlSi12Cu1(Fe)	240	1	70
349	EN AC-51200	EN AC-AlMg9	200	1	70

2.2. Metalurgie slitin hliníku

2.2.1. Tavení

Tavení je fyzikálně-chemický proces, v průběhu kterého dochází k oxidaci, naplynění, legování taveniny i vypařování některých složek taveniny. Během tavby přichází kov do styku s tuhými látkami (materiál kelímků, vyzdívky pecí, ocelové a litinové nářadí), plynnými (atmosféra pece a okolního prostředí, spaliny) a tekutými (již roztavená vsázka).

Ve slévárnách je snaha o docílení co nejčistší taveniny za přijatelných ekonomických podmínek. Faktory určující kvalitu taveniny jsou obsah vměstků, míra naplynění a dodržení předepsaného chemického složení materiálu, které do velké míry ovlivňuje charakter vsázkových surovin. [10]

Jednu část vsázkových surovin tvoří housky, které dodavatelé dodávají o kvalitě slitin prvního tavení (vyrobeny v hutích přímo z kovových rud) a slitin druhého tavení (vyrobeny v hutích ze šrotu). Slitiny druhého tavení tak mají větší obsah nečistot, a proto jsou levnější. [10]

Dle požadavků na kvalitu odlitků tvoří část vsázky vratný materiál (zmetky, nálitky apod.). Vrat zhoršuje kvalitu taveniny, protože obsahuje více vměstků, rozpuštěných plynů a dalších nečistot (tuky, oleje). S větším podílem vratu ve vsázce rostou požadavky na metalurgické ošetření taveniny. [10]

Jako vsázka by se neměly používat rozstříky, třísky a zatekliny, které obsahují mnoho oxidických vměstků, vlhkosti (ve formě hydroxidů na povrchu) a zbytků po barvách, emulzi, minerálních olejích

a mazadlech. Pokud se tento vrat využívá, doporučuje se vhodnými metodami (tryskáním, pomocí rozpouštědel, spalováním) omezit množství nečistot na minimum. [5] [10]

K tavení vsázkových surovin dochází v tavicích agregátech. Jednotlivé typy pecí mají různý vliv na kvalitu taveniny. Zdrojem tepla je buď palivo nebo elektrická energie. V případě spalování paliva (nejčastěji zemní plyn) se jedná o plynové pece. Elektrickou energii využívají odporové a indukční pece. Odporové pece jsou méně výkonné a oproti indukčním pecím u nich nedochází k víření taveniny (homogenizaci). Indukční pece využívají síťovou (50 Hz) nebo střední frekvenci (stovky Hz). [10]

Hojně používané konstrukční typy pecí ve slévárnách slitin hliníku jsou [10]:

- šachtové,
- kelímkové,
- dávkovací.

Výhodou **šachtových pecí** je kromě vysoké kapacity i oddělení tekutého kovu od pevné vsázky, která vždy obsahuje určitý podíl nečistot a vlhkosti. Pec tvoří šachta s dopravním zařízením, které do šachty dopravuje vsázku. Ta se zde předeheje, dojde k odpaření vlhkosti a organických nečistot. Samotné tavení probíhá v tavicí zóně, odkud pak odtéká tavenina do udržovací komory. Odtud se při naklopení pece odebírá do transportních pánví. [10]

Kelímkové pece slouží k tavení menšího množství kovu. Tavenina přichází do styku s kelímkem, který může být grafitošamotový, z SiC nebo z žáruvzdorných slitin železa. Aby nedocházelo k přímému styku taveniny s železem, je kelímkem opatřen vyzdívkou na bázi Al_2O_3 nebo SiO_2 . Výhodou je možnost využití kelímku i jako transportní pánve. Kelímkové pece mohou být plynové, odporové i indukční. [5] [10]

Dávkovací pece se používají k udržování taveniny na požadované teplotě. Bývají obvykle umístěny přímo u licího stroje a slouží k plnění formy taveninou. Tavenina se do nich průběžně doplňuje pomocí transportních pánví z tavicích pecí. V dávkovací peci bývá mírný přetlak atmosféry pece a tak nedochází k víření taveniny. Aby nemohlo dojít k naplynění a oxidaci taveniny, bývá někdy atmosféra tvořena ochranným plynem. [10]

Jelikož ve slévárnách věnujících se tlakovému lití není potřeba využívat chemické modifikátory, protože obdobného účinku na strukturu se zde dosáhne při rychlém tuhnutí, mezi hlavní problémy, které je nutno řešit při tavení, patří sklon slitin hliníku ke vzniku vměstků a vysoké rozpustnosti vodíku v tavenině. K tomu, aby bylo dosaženo modifikačního účinku bez užití modifikátorů, je nutné, aby rychlost postupu krystalizační fronty činila $400-1000 \mu m \cdot s^{-1}$. [10]

2.2.2. Vznik vměstků

Nekovové vměstky se podle původu dělí na exogenní (vnější původ, např. SiC z vyzdívky pecí) a endogenní (vznik chemickými reakcemi v tavenině, např. fluoridy, chloridy). Nekovové vměstky, které se často vyskytují ve slitinách hliníku, jsou uvedeny v tab. 2.6. [10]

Tab. 2.6 Výskyt vměstků ve slitinách Al [5] [10]

Typ	původ vměstků	Tvar	velikost (μm)
Al ₂ O ₃	struska	částice	0,2-30
		blány	10-5000
MgO	struska	částice	0,1-5
		blány	10-5000
MgAl ₂ O ₄	struska	částice	0,1-5
		blány	10-5000
chloridy, fluoridy	solí	částice	0,1-5
TiC	zjemňující přísady	částice	0,1-5
SiC	struska	částice	1-10000
Fe-Cr-Mn	chemická reakce	částice	1-50

Díky styku hliníku s atmosférou obsahuje tavenina takřka vždy oxidické vměstky, přičemž oxidace probíhá v tekutém i tuhém stavu podle rovnice:



Kyslík dle rovnice (1) reaguje s hliníkem za vzniku amorfního Al₂O₃, který na hladině tvoří oxidickou vrstvu. Ta je tvořena i dalšími oxidy legujících prvků a nečistot (Na, Sr, Ca). Neprodyšnost oxidické vrstvy udává Pilling-Bedworthův poměr (2):

$$P.B. = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Al_2O_3}} \quad (2)$$

V případě většího objemu oxidů (P.B. > 1) je vrstva nepropustná a dobře brání před další oxidací. Čistý hliník má P.B. = 1,27. Oxidy legur a nečistot (Na, Sr, Ca) mají P.B. < 1, čímž narušují nepropustnost oxidické vrstvy a umožňují tak pokračování oxidace. Pokud má tavenina teplotu okolo 770 °C, transformuje se spinel γ-Al₂O₃ na korund α-Al₂O₃. Ten díky své tvrdosti (2. nejtvrdší na Mohsově stupnici) velmi snižuje obrobitelnost. Transformací na korund, který má vyšší hustotu, se oxidická vrstva trhá a částice korundu mají sklon k sedimentaci. Aby se zamezilo vzniku korundu, nesmí být tavenina přehřívána nad 780 °C. [5] [10]

Velký vliv na oxidaci má tedy množství příměsí a nečistot, teplota taveniny a celistvost povrchové vrstvy taveniny. Z hlediska celistvosti této vrstvy je důležité, aby nedocházelo k víření a rozstříkávání taveniny. [10]

Dalším typem vměstků je **kalová fáze** Fe-Cr-Mn. Ta vzniká, pokud je v tavenině vyšší obsah Fe, Mn a Cr a tavenina je udržována na nízké teplotě. Teplota vzniku této fáze se odvíjí od komplexního vlivu daných prvků. Fáze tvoří tuhé polyedrické útvary, které vznikají peritektickou přeměnou. Protože hustota této fáze je až 3500 kg.m⁻³, částice sedimentují na dně pecí. Vzniku této fáze lze zabránit udržováním taveniny na vyšších teplotách a důkladným čištěním pecí. Přítomnost částic této

fáze se projevuje snížením tekutosti při lití, výrazným zhoršením obrobiteľnosti a zvýšeným opotřebením nástrojů. [10]

2.2.3. Naplynění taveniny

Plyn se v odlitku vyskytuje v několika formách:

- volně v dutinách materiálu (bubliny),
- vázané na sloučeniny (oxidy, nitridy),
- rozpuštěné ve slitině (vodík).

V případě, že se plyn váže do sloučenin, které vytváří povrchovou vrstvu (např. O_2 v Al_2O_3), může dojít postupně k samovolnému zabránění této reakce. K tomu dochází díky tomu, že nově vzniklá vrstva na povrchu brání dalšímu prostupu plynu do objemu taveniny. [10]

V případě rozpouštění (difuze) se plyn dostává do celého objemu taveniny. Rychlost reakce závisí na rychlosti jeho difuze. Plyn se rozpouští v tavenině, dokud nedojde k tvorbě nasyceného roztoku. [6]

Důsledkem přítomnosti plynů v tavenině je porézita, bublinatost, zhoršení mechanických vlastností a netěsnosti. [12]

Plyny se v taveninách kovů rozpouštějí endotermicky nebo exotermicky. K rozpouštění většiny plynů dochází endotermickým způsobem, který je charakteristický poklesem rozpustnosti při poklesu teploty taveniny. [10]

Aby nedocházelo k absorpci plynů taveninou, muselo by tavení probíhat ve vakuu nebo v ochranné atmosféře, která obsahuje nerozpustný plyn. [12]

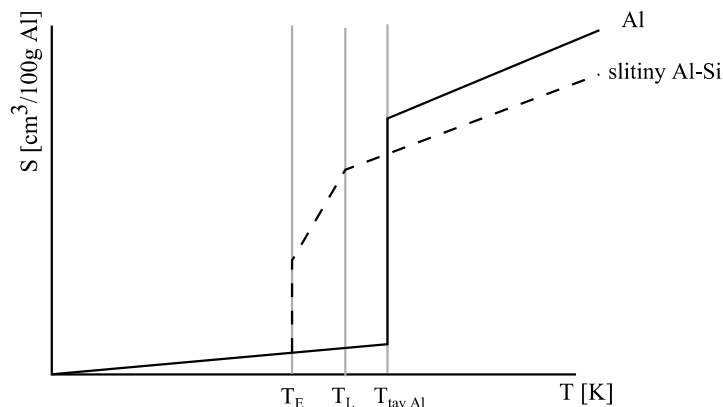
Jediný plyn rozpouštějící se v taveninách slitin hliníku je vodík. Ten také tvoří největší podíl plynných látek v tavenině. Vodík se do taveniny dostává jako důsledek vlhkosti ze vsázky, z rafinačních přípravků, z atmosféry pece apod. Voda resp. vodní pára reaguje při styku s taveninou za vzniku oxidu hlinitého a vodíku dle rovnice (3).



Pokud není vsázka před vložením do pece dostatečně přehřátá, je i ona zdrojem vodíku. Na povrchu takového vsázkového materiálu je vodík obsažen ve formě hydroxidu hlinitého. Ten vzniká díky oxidaci povrchu dle rovnice (4). [10]



Na obr. 2-3 je znázorněna závislost rozpustnosti vodíku na teplotě. Vodík se rozpouští endotermickým způsobem tzn. že s poklesem teploty taveniny dochází ke snížení rozpustnosti daného plynu. K největšímu nárůstu podílu vodíku v hliníku dochází skokově při teplotě tavení $T_{\text{tav_Al}}$ a s dalším ohřevem rozpustnost roste, ale ne už takovým tempem. Obdobný průběh je i u siluminů, kdy ke skokovému nárůstu rozpustnosti dochází při eutektické teplotě T_E , poté roste mírněji až do dosažení teploty likvidu T_L . V plně tekutém stavu rozpustnost roste pomalejším tempem. Konkrétní průběh závisí na daném typu slitiny. [6]



Obr. 2-3 Vliv teploty na rozpustnost H_2 v Al a ve slitinách Al-Si [10]

Objem rozpuštěného vodíku se udává v cm³ na 100 g kovu nebo v hmotnostních procentech wt %, případně v ppm (1ppm=10⁻⁴ %). Běžný obsah vodíku v tavenině slitiny hliníku se pohybuje okolo 0,6 cm³/100 g Al.[10] [12]

Pro výpočet rozpustnosti v daném kovu platí rovnice (5)

$$\log S = \frac{1}{2} \log p_{H_2} - \frac{A}{T} + B, \quad (5)$$

kde značí: S – rozpustnost vodíku v tavenině [cm³/100 g Al],

p_{H_2} – parciální tlak vodíku v okolní atmosféře [Pa],

T – teplotu kovu [K],

A, B – konstanty pro daný kov.

Na množství rozpuštěného vodíku má vliv i jeho parciální tlak v okolním prostředí. Pro dvouatomové plyny tuto závislost vyjadřuje Sievertsův zákon (6): [10] [12]

$$S = k \cdot \sqrt{p_{H_2}} \quad (6)$$

kde značí: k – konstantu pro danou slitinu a teplotu.

Pokud je v kovu více plynu, než udává jeho rozpustnost za rovnovážných podmínek, jedná se o přesycený tuhý roztok, který vzniká při nerovnovážném procesu např. při rychlém podchlazení. [10]

Odlitky odlité z naplyněné taveniny se poté stávají zmetky, protože porezitu nelze dalšími operacemi odstranit. Těmto problémům lze předcházet kvalitní metalurgickou přípravou taveniny před samotným litím. Přítomnost vodíku v odlitku se negativně projevuje: [10]

- snížením pevnosti a tažnosti,
- vyšší náchylností ke vzniku únavových lomů,
- netěsnostmi,
- snížením kvality povrchu.

Vznik bublin, resp. vada označovaná jako porezita, je zapříčiněn poklesem rozpustnosti vodíku v tavenině při tvorbě tuhé fáze. Obecně mohou bubliny vznikat homogenní nebo heterogenní nukleaci, přičemž v praxi se uplatňuje pouze heterogenní nukleace. Při té tvoří zárodek bubliny cizí tuhá částice. Materiál této částice musí být nesmáčivý s taveninou, což se projeví malým povrchovým napětím

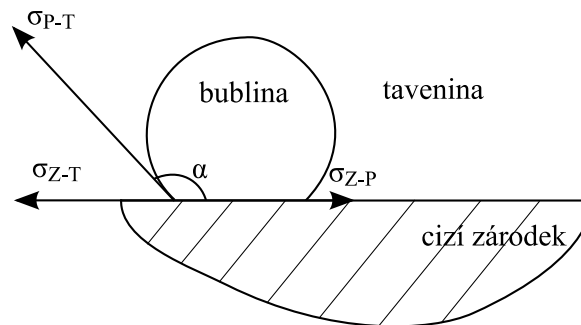
σ_{c-T} a zápornou hodnotou $\cos(\alpha)$ (α větší než 90°), který se určí dle rovnice (7). Kontaktní úhel α určuje smáčivost bubliny a cizí částice. Situace při heterogenní nukleaci je znázorněna na obr. 2-4. [10] [12]

$$\cos \alpha = \frac{\sigma_{Z-T} - \sigma_{Z-P}}{\sigma_{P-T}} \quad (7)$$

kde značí: σ_{Z-T} – povrchovou energii rozhraní zárodka a taveniny [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$],

σ_{Z-P} – povrchovou energii rozhraní zárodka a plynu [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$],

σ_{P-T} – povrchovou energii rozhraní plynu a taveniny [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$].

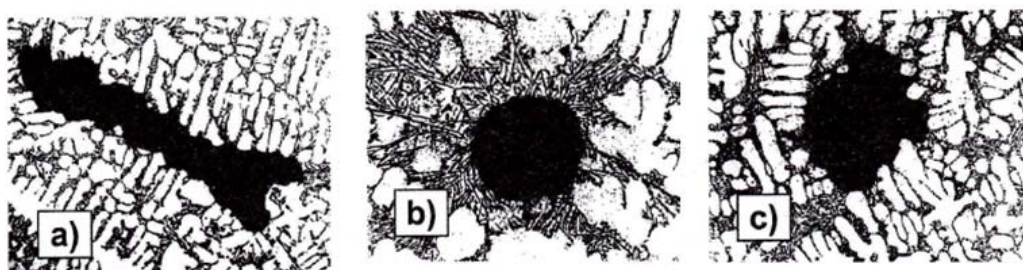


Obr. 2-4 Situace při heterogenní nukleaci

Z výše uvedeného vyplývá, že ne všechny cizí látky přítomné v tavenině jsou vhodné k růstu zárodků bublin. Danou podmínku nejlépe splňují oxidy. Množství oxidických vměstků tedy přímo souvisí s poretitou. [10]

Vliv na vylučování bublin vodíku na vměstcích je dán i tím, že tyto vměstky již mohou obsahovat tzv. iniciační bubliny díky nimž není nutná nukleace nových bublin. [10]

Na nukleaci bublin má vliv i mechanismus vzniku mikrostaženin. Ten se uplatňuje, kdy již ztuhlá fáze brání dalšímu dosazování tekutého kovu. Důsledkem takovýchto objemových změn je tedy vznik mikroskopických dutin s nižším parciálním tlakem vodíku. Vodík do těchto dutin difunduje, čímž se zlepšují podmínky pro nukleaci bublin. Mikrostaženiny jsou tak vhodným prostorem pro nukleaci bublin vodíku. [5] [10]



Obr. 2-5 Tvar pórů ve slitinách Al a) mikrostaženina, b) bublina, c) poretita (plyn a mikrostaženina) [10]

Na obr. 2-5. je zobrazen tvar pórů, resp. vada zvaná poretita, v závislosti na tom, jestli převažuje mechanismus vzniku bublin nebo mechanismus vzniku mikrostaženin. Nejčastěji mají póry členitý tvar. [10]

2.2.4. Rafinace a odplyňování taveniny

Rafinace je běžně používaný proces čištění taveniny, kterým se snižuje množství vměstků a rozpuštěných plynů v tavenině. [10]

Rafinace se provádí

- filtrací taveniny,
- rafinačními solemi,
- probubláváním plynu.

Filtrace spočívá v mechanickém zachycení vměstků filtry. Tyto filtry, využívané obvykle při přelévání taveniny z tavicích pecí do pánví, mohou být kovové, keramické nebo tkaninové. Tímto způsobem by se měli z taveniny dostat větší pevné vměstky, používá se proto jen jako doplňková metoda ošetření taveniny. [10]

Běžným způsobem *rafinace* je použití rafinačních solí k odstranění oxidických vměstků a nežádoucích prvků. Soli jsou na bázi fluoru a chloru s přísadami látek ovlivňujících povrchové napětí oxidických vměstků a kovu. Nečistoty vyplavou na hladinu, ze které se sbírají. Nevýhodou bývá vysoký podíl hliníku ve strusec. [10]

Důležitou metalurgickou operací je *odplyňování*, kterým se snižuje obsah plynu (vodíku) v tavenině a tím se zabraňuje vzniku bublin v odlitku. Odplyňování má být tím intenzivnější, čím je pomalejší tuhnutí. Rychlost tuhnutí se odvíjí od použité technologie a od tloušťky stěn odlitku. U gravitačního lití do písku je tak vyžadováno lepší odplynění než např. u tlakového lití do kovových forem, které lépe odvádí teplo. [10]

V některých případech např. u tvarově složitých odlitků nebo u odlitků, kde je problém s nálitkáním, je naopak jistá míra naplynění požadována. Vznikající bubliny kompenzují úbytek taveniny vlivem stahování. Cílené naplynění lze využít hlavně pro odlitky, na které nejsou vysoké požadavky těsnosti, kvality povrchu nebo vysoké pevnosti. [10]

Technologie odplyňování se provádí

- vakuováním,
- probubláváním inertními plyny,
- probubláváním aktivními plyny.

Technologie *odplyňování vakuováním* spočívá ve vytvoření přesyceného roztoku vodíku v tavenině. Přesyceným roztokem se tavenina stane, obsahuje-li vyšší množství vodíku, než je maximální rozpustnost za podtlaku. Dle Sievertsova zákona (6) platí, že snížením parciálního tlaku plynu v okolí taveniny se snižuje rozpustnost daného plynu v tavenině. V praxi se provádí vakuovacím zařízením, kterým se sníží tlak nad taveninou na hodnotu v řádu kPa. Zařízení má vakuovací komoru, do které se umístí transportní pánev s taveninou. Poté se komora uzavře a vytvoří se podtlak. Dobu odplyňování lze regulovat pouhým pohledem skrz víko, kde lze pozorovat s časem klesající intenzitu reakce. Tento způsob odplyňování je efektivní, dosahuje se po něm obsahu vodíku v řádu setin $\text{cm}^3/100 \text{ g Al}$. [10]

Při použití **proublávaní inertními plyny** jsou bubliny tohoto plynu vháněny do taveniny. Bubliny mají nulový parciální tlak vodíku a ten tak do těchto bublin difunduje a stoupá k hladině. Používaným inertním plynem je dusík nebo argon. Aby bylo odplyňování účinné, musí mít plyn, kterým se odplyňuje, vysokou čistotu. Pro dusík se požaduje čistota 99,99 %. [10]

Faktory ovlivňující kvalitu odplyňování popisuje Stokesův zákon, udávající sílu, která působí na částici (bublinu nebo pevný vměstek) v tekutině. Tato síla je dle rovnice (8) rovna rozdílu gravitační a vztlakové síly a na základě této rovnice lze určit rychlost vyplouvání částice podle rovnice (9). [6] [10]

$$F = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{kovu} \cdot g - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{plynu} \cdot g, \quad (8)$$

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot (\rho_{kovu} - \rho_{plynu})}{\eta} \cdot r^2, \quad (9)$$

kde značí: r – poloměr bubliny sférického tvaru [m],
 η – dynamickou viskozitu taveniny [Pa.s],
 ρ – hustotu taveniny resp. plynu [kg.m⁻³],
 v – rychlost pohybu bubliny [m.s⁻¹].

Odplyňování je tím účinnější, čím je menší poloměr bubliny. Snižuje se tak rychlost vyplouvání bublin k povrchu resp. se zvyšuje doba jejich vyplouvání. Plyn by měl homogenně procházet ode dna celou taveninou. [10]

Aktivní plyny (chlor, fluor) na rozdíl od inertních s vodíkem reagují. Princip vhánění bublin tohoto plynu je obdobný jako u odplyňování inertními plyny. Nevýhodami tohoto způsobu je nadměrná zátěž životního prostředí a s tím spojené dodržování norem, dále pak odstraňování Mg a dalších např. modifikačních prvků Na, Sr. [10]

2.2.5. Provozní kontrola metalurgické čistoty taveniny

Během výroby je nutná nejen kontrola teploty a chemického složení taveniny, ale i kontrola její metalurgické čistoty. Tato kontrola musí být rychlá a snadná, aby bylo možné rychle rozhodnout o uvolnění tavby pro lití nebo nutnosti pokračování rafinace taveniny. Díky tomu nemohou být nároky na provozní zkoušky stejné jako na ty laboratorní, kde díky technickému vybavení a časovému prostoru lze dosáhnout vyšší přesnosti. Kontrola prováděná v provozu nemusí být tolik přesná, ale musí být zajištěna reprodukovatelnost výsledků. Proto je nezbytné, aby měřící přístroj byl zkalibrován a měl kalibrační list.

Laboratorní metody fungují na principu vakuové extrakce vodíku ze speciálně připraveného vzorku kovu. Vzhledem k vysoké ceně zařízení a velké časové náročnosti se používají zřídka. [10]

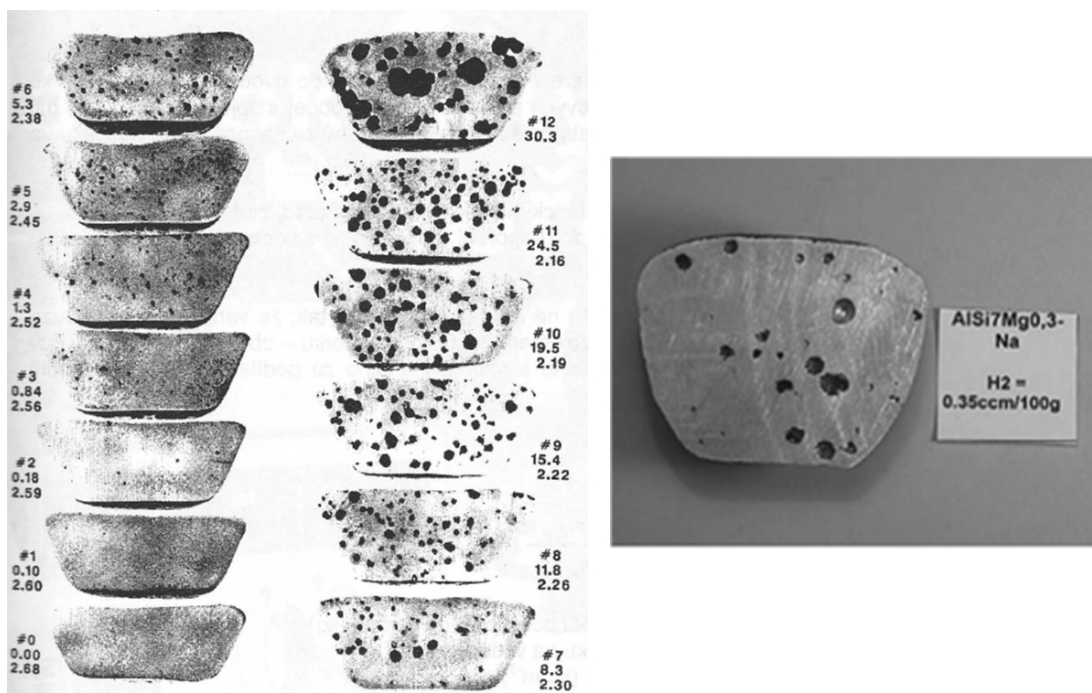
Mezi provozní zkoušky čistoty taveniny v průmyslové praxi patří: [10]

- Straube-Pfeifferova zkouška,
- Metoda první bubliny,
- Metoda dvojího vážení,
- Drosstest,
- Chapel.

Kromě metody využívající zařízení Chapel slouží výše zmíněné metody k souhrnnému posouzení míry naplynění a obsahu vměstků. Výhodou těchto metod (Straube-Pfeifferova zk., metoda dvojího vážení a Drosstest) je možnost jejich vykonání na jednom přístroji. Mezi nejnovější zařízení patří např. Vacuum Density Tester od firmy mk Industrievertretungen, nebo Alu Speed Tester firmy FMA Mechatronic Solutions AG.

Princip **Straube-Pfeifferovy zkoušky** spočívá ve ztuhnutí vzorku o hmotnosti 200 - 230 g za podtlaku 5 - 10 kPa, kdy se z taveniny vyloučí vodík ve formě bublin. Růst objemu vodíkových bublin při tuhnutí tak kompenzuje úbytek kovu v důsledku stahování. Povrch vzorku s vyšším obsahem vodíku má vystouplý tvar, zatímco u málo naplyněné taveniny je povrch mírně propadlý. Vzorek se následně příčně rozřízne a pomocí vzorníku, znázorněného na obr. 2-6, se provede polokvantitativní vizuální vyhodnocení množství vměstků a naplynění (u vzorníku horní číslice značí číslo vzorku, prostřední číslo procento pórů na řezné ploše a spodní číslo hustotu vzorku). Při opakovaném provádění zkoušky je nutné dodržovat stejné podmínky měření, především stejný tlak při kterém vzorek tuhne a stejnou velikost vzorku. Zkouškou se hodnotí jak naplynění, tak i obsah vměstků. Tento fakt je dán tím, že nekovové vměstky mohou sloužit jako nukleační zárodky bublin. Při stejné úrovni naplynění se tak v tavenině s vyšším obsahem vměstků vyloučí více bublin, než tomu bude u taveniny s nižším obsahem vměstků. Výhodou této zkoušky je odlití pouze jednoho vzorku a využitelnost zařízení i k jiným zkouškám (Drosstest, Metoda první bublinky). Nevýhodou je jednak polokvantitativní způsob vyhodnocení zkoušky, kdy porovnání vzorku se vzorníkem do velké míry závisí na pozorovateli, jednak nedostatečný přehled o obsahu vměstků, které nejsou vhodnými nukleačními zárodky. [10]

Mezi méně využívané metody patří **metoda první bubliny**. Tato metoda slouží k předpovědi množství vměstků a naplynění. Spočívá v odlití vzorku do kelímku, který je posléze umístěn do hermeticky uzavřeného prostoru. Kelímek může být vyhříváný nebo studený. Z uzavřeného prostoru se následně odčerpá vzduch, čímž vznikne podtlak. U vzorku začne vyrovnávání tlaku plynu rozpuštěného ve vzorku a tlaku plynu v uzavřeném prostoru, což se projeví stoupáním bublin plynu na hladinu. Jakmile se objeví první bublina, z přístroje se studeným kelímkem se odečte teplota a tlak, které se dosadí do rovnice (5) pro výpočet rozpustnosti vodíku v tavenině. Pokud je kelímek vyhříváný, teplota zůstává konstantní a zjišťuje se pouze tlak. Hodnota tlaku se následně dosadí do Sievertsova zákona (6). Výhodami této metody je rychlost jejího provedení a použitelnost pro všechny typy hliníkových slitin. Zásadní nevýhodou je obtížná reprodukovatelnost měření, jelikož měření je do velké míry ovlivněno subjektivním hodnocením obsluhou. [10]



Obr. 2-6 Vzorník pro Straube-Pfeifferovu zkoušku (vlevo), vzorek po rozříznutí (vpravo) [10] [13]

Z důvodu obtížné reprodukovatelnosti zkoušky vyvinula Firma FMA Mechatronic Solutions AG unikátní zařízení ALUTESTER, viz obr. 2-7, speciálně pro měření metody první bubliny. Zařízení disponuje snímací kamerou, která zaznamenává vznik první bubliny na hladině vzorku, čímž odpadá subjektivní vliv obsluhy. Na display se následně zobrazuje hodnota objemu vodíku rozpuštěného v tavenině. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady na zařízení. [9]



Obr. 2-7 Zařízení ALUTESTER

Velmi často se využívá *metoda dvojího vážení* tzv. Dichte index, spočívající v porovnání hustot vzorku ztuhlého za atmosférického tlaku a za podtlaku. Dle Sievertova zákona (6) rozpustnost vodíku s klesajícím tlakem klesá. Vzorek ztuhlý za podtlaku má proto nižší hustotu, jelikož obsahuje vyloučené bubliny vodíku. Na hodnotu DI má tedy vliv množství vodíku, které se vyloučilo na vhodných zárodcích za vzniku bubliny. V případě Dichte indexu (indexu hustoty, DI) je podtlak 80 mbar a vzorek tuhne po dobu 4 minut. Jak vypadají vzorky, ukazuje obr. 2-9. Při vyšším obsahu vodíku je patrné, že vzorek tuhnoucí za podtlaku má vlivem nárůstu objemu vyloučeného vodíku

vystoupilý povrch, naproti tomu vzorek tuhnoucí za atmosférického tlaku má povrch vlivem úbytku objemu při tuhnutí propadlý. Vyplování bublinek vodíku při tuhnutí vzorku za podtlaku ukazuje obr. 2-8. [9] [10]

Po ztuhnutí vzorků se oba vzorky zvaží nejprve na vzduchu a poté ve vodě. Při vážení vzorku ve vodě zaznamená přístroj pouze přírůstek hmotnosti vody, kterou ponořený vzorek svým objemem vytlačil. Hustoty vzorků se zjistí dle rovnic (10, 11). [10]



Obr. 2-8 Vyplování bublin H_2 při tuhnutí vzorku za podtlaku u metody dvojího vážení



Obr. 2-9 Vzorky pro Dichte index (vlevo), přístroj Vakuum Density Tester (vpravo) [13]

$$V_{VZ} = \frac{m_{VZ_H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (10)$$

$$\rho_{VZ} = \frac{m_{VZ_at}}{V_{VZ}} = \frac{m_{VZ_at}}{m_{VZ_H_2O}} \cdot \rho_{H_2O} \quad (11)$$

kde značí:

- ρ_{VZ} – hustotu vzorku [$kg \cdot m^{-3}$],
- ρ_{H_2O} – hustotu vody [$kg \cdot m^{-3}$],
- $m_{VZ_H_2O}$ – hmotnost vzorku ve vodě [kg],
- m_{VZ_at} – hmotnost vzorku na vzduchu [kg],
- V_{VZ} – objem vzorku [m^3].

Pokud tedy známe hustoty vzorku tuhnoucího za podtlaku a za normálního tlaku, určí se Dichte index dle rovnice (12).

$$DI = \frac{\rho_{VZ\text{vzduch}} - \rho_{VZ\text{podtlak}}}{\rho_{\text{vzduch}}} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

kde značí: $\rho_{VZ\text{vzduch}}$ – hustotu vzorku tuhnoucího na vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 $\rho_{VZ\text{podtlak}}$ – hustotu vzorku tuhnoucího za podtlaku [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 DI – Dichte index [%].

Touto zkouškou se tedy zjistí úroveň naplynění, nezjistí se ale celkový vliv vměstků, ale jen těch, které tvoří vhodný zárodek pro bubliny. Výhodami této zkoušky jsou jednoduchost a reprodukovatelnost měření. V praxi se index hustoty udává s přesností na jednotky příp. na desetiny procenta. Provedení zkoušky trvá 7 – 10 minut. [9]

Přístroje k tvorbě vzorků pro tzv. DI, viz obr. 2-10, umožňují i tvorbu vzorků pro **Drosstest**. U této zkoušky se odlévá pouze vzorek tuhnoucí za podtlaku 1 mbar. Hmotnost vzorku je cca 200 g Al. Vzorek tuhne ode dna po dobu asi 10 min a nečistoty postupně vyplouvají na povrch. Test spočívá v optickém vyhodnocení povrchu vzorku, přičemž se jím vyhodnocuje obsah vměstků v tavenině. Nevýhodnou metody je nemožnost kvantifikace výsledků. [10]



Obr. 2-10 Vzorek pro Drosstest [13]

Pro přímé stanovení objemu rozpuštěného vodíku v tavenině (s přesností $0,01 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/100\text{g}$ kovu) lze využít nové přenosné zařízení **Chapel** od firmy FMA Mechatronic Solutions AG. Měřicí rozsah zařízení je $0,05 - 9,99 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/100\text{g}$ kovu. Měření se provádí pomocí sondy opatřené na konci porézním grafitem. Grafitový konec sondy funguje jako umělá bublina, přes kterou difunduje vodík z taveniny do té doby, než dojde k vyrovnání parciálního tlaku vodíku v tavenině a v sondě. Materiál sondy je z nitridu křemíku a vyznačuje se odolností proti teplotním šokům. Životnost této sondy je udávána přibližně jeden rok. Čas měření je 7 – 10 minut. Výsledky zkoušky lze posléze přenést do počítače. Výhodou u této zkoušky je to, že se nemusí pořizovat ztuhlý vzorek materiálu, jelikož se měření provádí přímo v tavicích pecích či transportních pánvích. [5] [15]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce vznikla ve spolupráci s firmou KSM Castings CZ a.s. v Hrádku nad Nisou, která se věnuje výrobě odlitků ze slitin hliníku technologií vysokotlakého lití. Většina těchto odlitků je určena pro automobilový průmysl.

Cílem provedených experimentů bylo vyhodnocení metalurgické čistoty taveniny, tedy zjištění obsahu vměstků a naplynění taveniny, s ohledem na dobu odplyňování taveniny. V rámci experimentu byla použita slitina AlSi8Cu3. Předepsané číselné a chemické složení této slitiny podle normy ČSN EN 1706 uvádí tab. 3.1 (dle německé normy DIN 1725 je slitina označována 226). Provedený experiment byl rozdělen do *dvou fází*.

První fáze měla za cíl vyhodnotit kvalitu vstupního materiálu od dvou dodavatelů z celkového počtu dvanácti. V této fázi byla hodnocena kvalita vstupního materiálu od dodavatele Metal Trade Comax a.s. a Martin Metals.

V rámci *druhé fáze* byl u standardně připravované taveniny (60 % vratu a 40 % nových housek) vyhodnocován vliv doby odplyňování na kvalitu taveniny.

Tab. 3.1 Chemické složení slitiny AlSi8Cu3 dle normy ČSN EN 1706

Označení slitiny			Chemické složení [%]							
VDS	číselné	chemické	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	
226	EN AC- 46200	EN AC- AlSi8Cu3	7,5-9,5	0,7	2,0-3,5	0,15- 0,65	0,15- 0,55	-	0,35	
			Chemické složení [%]					Obsah nečistot [%]		
			Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	jeden prvek	celkem	
			0,35	1,2	0,25	0,15	0,2	0,05	0,25	

3.1. Příprava taveniny

Tavírna společnosti KSM Castings CZ a.s. je vybavena plynovými kelímkovými pecemi a šachtovými pecemi. Vsázkový materiál je před vložením do pece ponechán dostatečně dlouhou dobu v její blízkosti, aby došlo k vysušení materiálu. Poté, co je vsázka natavena, se přelije do transportních pánví, kterými se tavenina dopraví k jednomu ze dvou FDU zařízení. Jedno z FDU obsahuje automatický dávkovač rafinační soli, u druhého se přidávání soli provádí ručně.



Obr. 3-1 Zařízení FDU s rotorem firmy Foseco

Pro *první fázi* experimentu probíhalo tavení vsázky v plynové kelímkové peci MORGAN, která je uvedena na obr. 3-2. Vsázka byla vždy tvořena pouze 100 % novými houskami od daného dodavatele. Mezi jednotlivými tavbami byla pec vyčištěna. Po natavení byla tavenina vždy přelita do transportní pánve, ve které byla pomocí zařízení FDU (viz obr. 3-1) rafinována a odplyňována. Jako nosný plyn byl použit dusík 4.0, který má čistotu 99,99 %. Průtok probublávaného dusíku byl 12 l/min a čas odplyňování 240 s. Během odplyňování se do taveniny ručně nadávkovala rafinační sůl ARSAL 2125 ve formě granulátu o objemu 0,25 kg na 1 kelímek taveniny, přičemž kelímek je určen pro 450 - 500 kg taveniny. Tato sůl snižuje podíl kovu ve strusce, omezuje vznik korundu, snižuje obsah rozpuštěného vodíku a odstraňuje oxidy z taveniny. [16]



Obr. 3-2 Plynová kelímková pec

U *druhé fáze* experimentu probíhalo tavení v šachtových pecích STRIKO WESTOFEN. Vsázku tvořil běžně používaný poměr přibližně 60 % vratu a 40 % housek, přičemž zde se již nezkoumal vliv konkrétního dodavatele těchto housek. Z peci byla tavenina v transportních pánvích zavážena k FDU s automatickým dávkovačem rafinační soli ARSAL 2125 (0,2 kg/500 kg taveniny), kde byly nastavovány různé časy odplyňování (od 40 s do 160 s po 20 s), přičemž množství soli bylo konstantní a průtok dusíku činil 17 l/min, vyjma doby zajíždění rotoru, kdy byl průtok pouze 5 l/min. Tento snížený průtok měl za úkol pouze zabránit ucpání trysek rotoru. Cyklus práce zařízení FDU pro jeden kelímek ukazuje tab. 3.2.

Tab. 3.2 Cyklus FDU pro zpracování taveniny

Operace	Čas [s]	Průtok dusíku [l/min]
1. Zpracování-zajetí rotoru	10	5
2. Tvorba víru	10	17
3. Přísada granulátu	8	17
4. Reakční doba	10	17
5. Zpracování-zajetí vlnolamu	40, 60...160	17
6. Konečné zpracování-vyjetí rotoru	10	17

3.2. Hodnocení kvality vstupního materiálu

V rámci první fáze experimentu probíhalo hodnocení kvality vstupního materiálu na základě metody dvojího vážení a následném zjištění hodnoty *Dichte indexu*. Vzorky byly pořízeny na přístroji Vacuum Density Tester, přičemž odběr vzorků probíhal z transportní pánve ihned po odplyňování taveniny.

Zařízení pro metodu dvojího vážení Vacuum Density Tester, viz obr. 3-3, disponuje dvěma komorami, do kterých se vkládají zkušební kelímky z nerezavějící, žáruvzdorné oceli. Jedna z těchto komor slouží pouze k předeřevu zkušebních kelímků, a to na teplotu 200 °C. Druhá - vakuová komora, se skládá ze dvou dílů. Horní díl je vybaven bezpečnostním sklem, kterým lze pozorovat tuhnoucí vzorek. V dolním dílu je umístěn zkušební kelímek se vzorkem taveniny. Tuhnutí vzorku při zadaném podtlaku zajišťuje vakuová pumpa, přičemž zařízení umožňuje tuhnutí za podtlaku 80 mbar (pro Dichte index), 30 mbar (pro Straube-Pfeifferovu zkoušku) a Final vakuum - ca. 5 mbar (pro Drosstest). Dále je přístroj vybaven časovým spínačem a termočlánkem pro měření teploty zkušebního kelímku. Nastavené parametry (čas a tlak) se zobrazuje na digitálním display. [13]



Obr. 3-3 Zařízení Vacuum Density Tester

Pro stanovení indexu hustoty byla použita elektronická váha Mk 2200, viz obr. 3-4, s reprodukovatelností 0,01 g. [13]

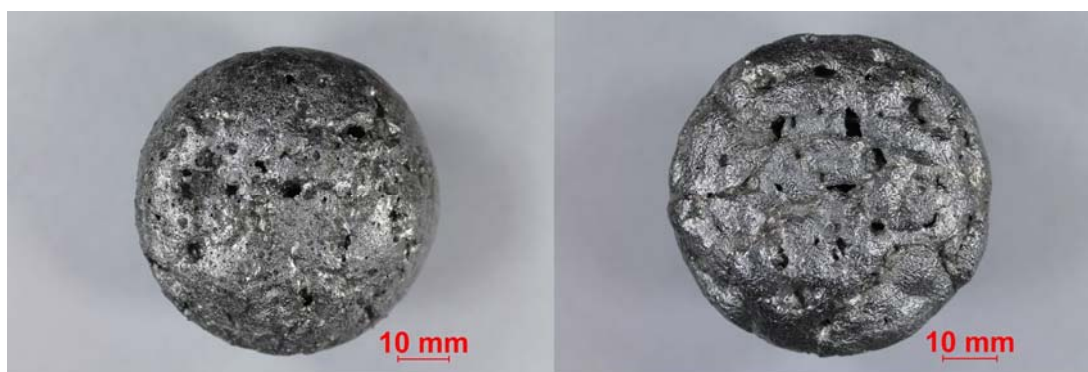


Obr. 3-4 Elektronická váha Mk 2200 [13]

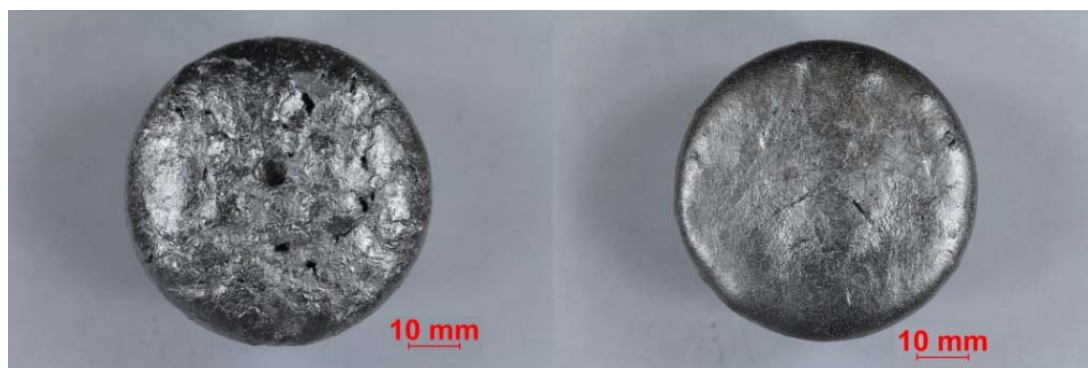
Naměřené hodnoty Dichte indexu po odplyňování se pro oba vstupní materiály příliš nelišily. Pro materiál Comax činila hodnota DI = 0,6 % a pro materiál Martin Metals hodnota DI = 0,5 %. Pro oba materiály tak byla naměřena hodnota menší než stanovuje interní předpis slévárny (DI = 1 %), kdy může být tavenina z tavní rozvezena do udržovacích pecí na jednotlivých licích pracovištích.

Pro hodnocení materiálu byla dále použita zkouška **Drosstest**. Výsledky Drosstestu nebyly určeny ke kvantitativní kontrole, ale měly sloužit pouze k orientační předpovědi o množství vměstků. Pro pořízení vzorků bylo využito stejné zařízení Vacuum Density Tester jako pro vzorky sloužící k vyhodnocení Dichte indexu. Tavenina se nalila do přehřátého zkušební kelímku pro Drosstest. Tento vzorek tuhnul při tlaku 1mbar (režim Final) přibližně 10 minut. Pro každý druh vstupního materiálu byl pořízen vzorek před i po rafinaci.

Z hodnocení povrchu vzorků Drosstestu je patrné, že u materiálu Martin Metals se vyskytuje velké množství vměstků a oxidických plen, a to i u vzorku po rafinaci, viz obr. 3-5. U materiálu Comax na obr. 3-6 je povrch vzorku Drosstestu po rafinaci téměř hladký, což napovídá nízký obsah nečistot v tavenině.

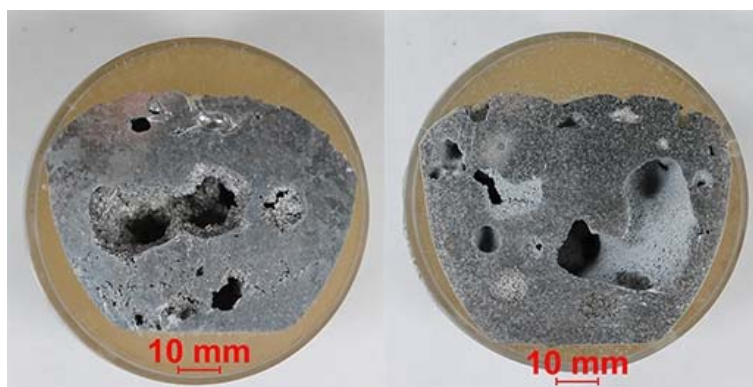


Obr. 3-5 Vzorek Drosstestu pro materiál Martin Metals před rafinací (vlevo) a po rafinaci (vpravo)

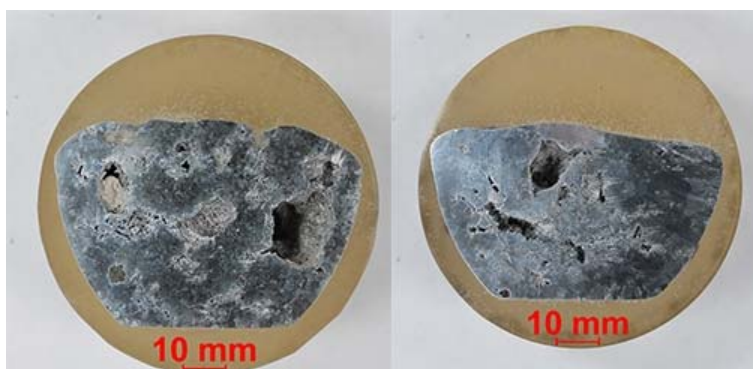


Obr. 3-6 Vzorek Drosstestu pro materiál Comax před rafinací (vlevo) a po rafinaci (vpravo)

Vzorky z Drosstestu byly následně rozříznuty a připraveny běžným metalografickým postupem, viz obr. 3-7 a obr. 3-8. Nejprve se vždy polovina vzorku zalila do dentacrylu. Po samovolném vytvrzení se následně zalité vzorky brousily a leštily na automatické brusce Phoenix 4000 firmy Buehler, kde byly vzorky postupně broušeny brousícími papíry se zrnitostí 120, 240, 400, 600, 800 a leštěny diamantovou suspenzí MetaDi suspenze 3 μ m. Pro zvýraznění struktury byly vzorky leptány 0,5 % roztokem kyseliny fluorovodíkové ve vodě.



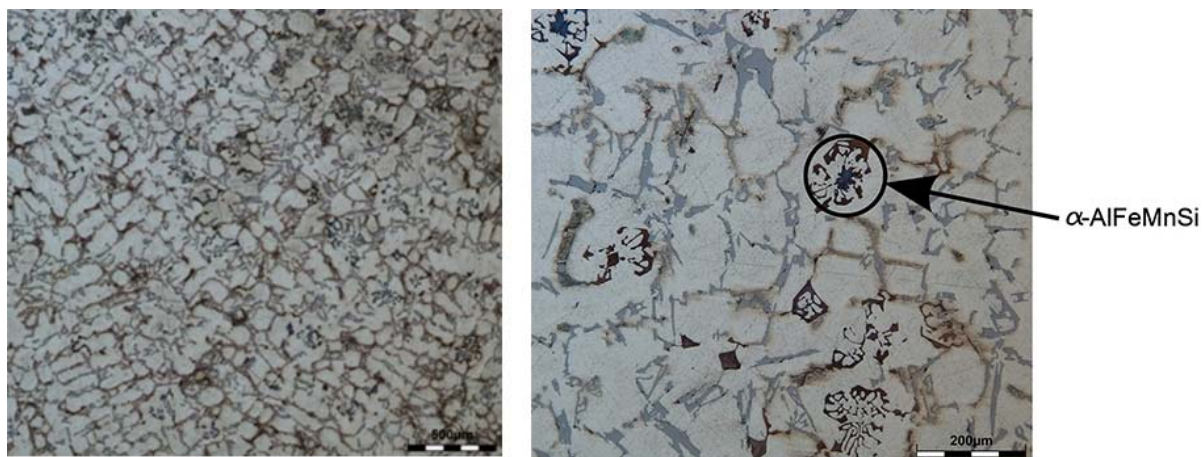
Obr. 3-7 Vzorky Drosstestu materiálu Martin Metals v řezu-před rafinací (vlevo) a po rafinaci (vpravo)



Obr. 3-8 Vzorky Drosstestu materiálu Comax v řezu-před rafinací (vlevo) a po rafinaci (vpravo)

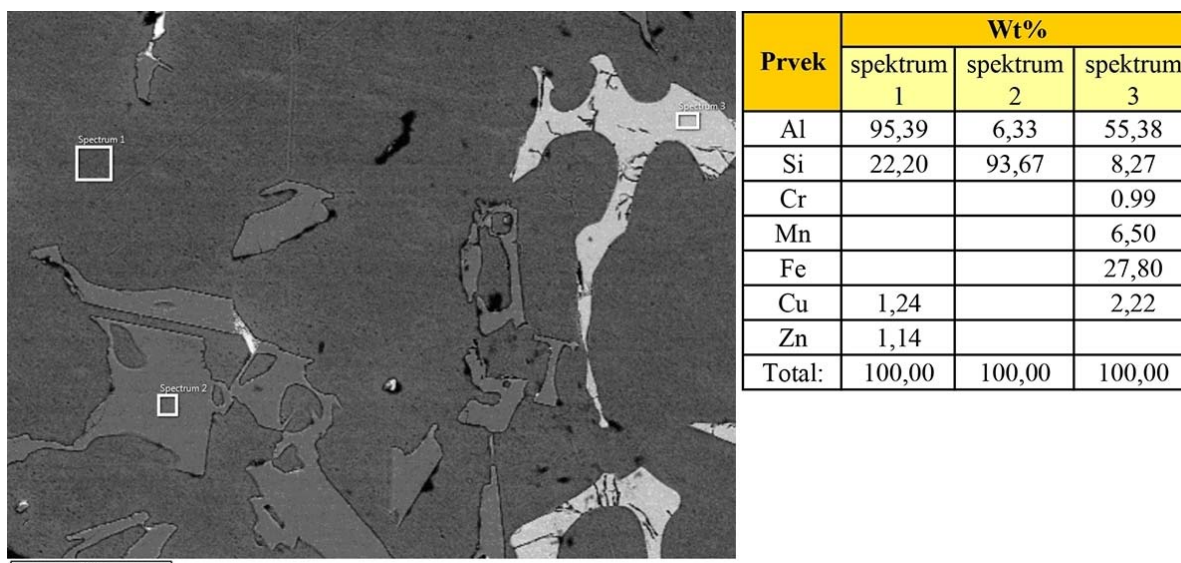
Pro hodnocení mikrostruktury vstupního materiálu Comax a Martin Metals byl použit optický mikroskop Olympus DSX 500 a elektronový mikroskop Carl Weiss Ultra Plus umožňující analýzu chemického složení. Pozorování bylo provedeno za účelem identifikace intermetalických fází s ohledem na přítomnost železa.

Na obr.3-9 je ukázána struktura slitiny od dodavatele *Comax* po rafinaci. Jedná se o charakteristickou mikrostrukturu podeutektického siluminu, která je tvořena tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$ a eutektikem. Ve struktuře se vyskytuje železo ve formě α -fáze ($\alpha\text{-AlFeMnSi}$), pro svůj charakteristický tvar nazývanou „čínské písmo“ či „rybí kost“. Železo vyloučené ve formě jehlic, tj. β -fáze ($\beta\text{-AlSiFe}$), se vyskytuje pouze ojediněle.



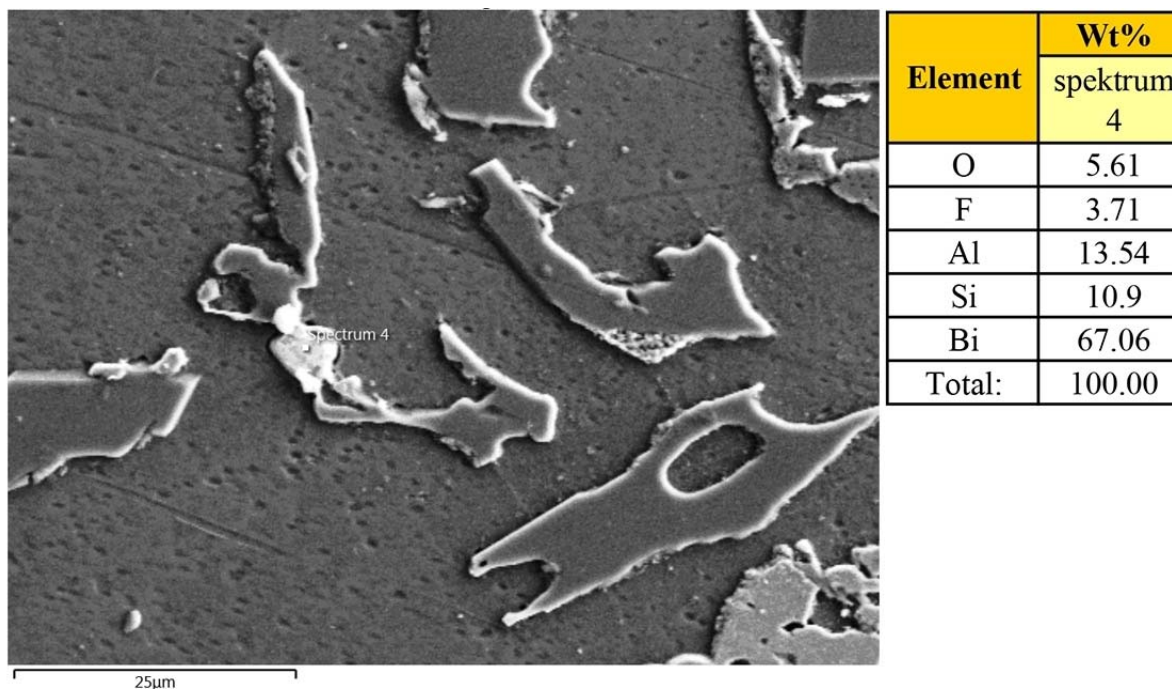
Obr. 3-9 $\alpha\text{-AlFeMnSi}$ fáze ve struktuře materiálu Comax

Struktura vzorků z elektronového mikroskopu je uvedena na obr. 3-10 až 3-12. Na obr. 3-10 z elektronového mikroskopu se vyskytuje kalová fáze na bázi Al-Fe-Mn-Si s menším obsahem mědi a chromu. Ve struktuře materiálu se tato fáze vyskytuje pouze ojediněle.

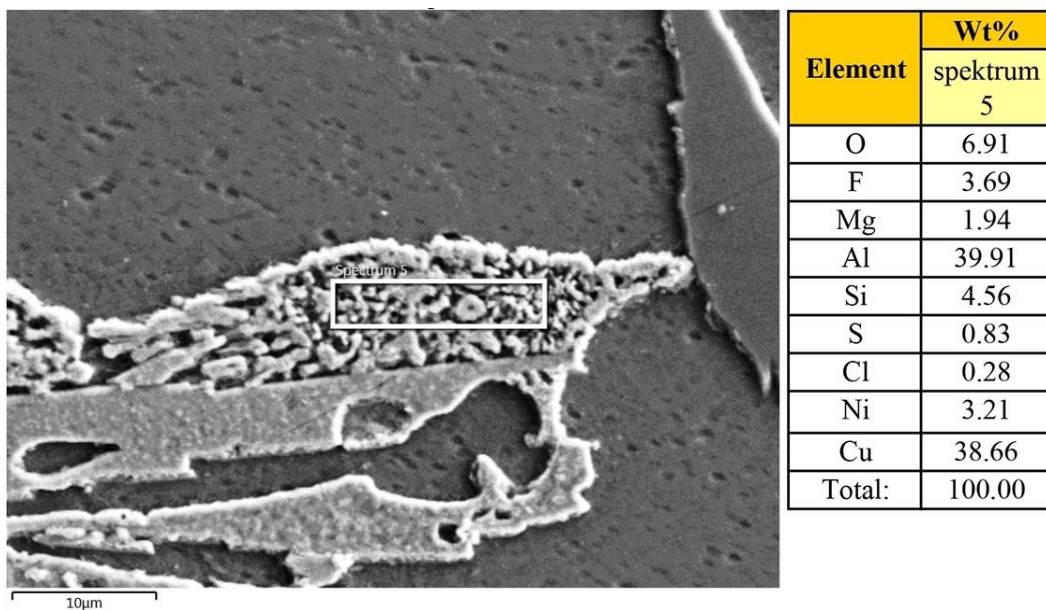


Obr. 3-10 Analýza intermetalických fází ve struktuře materiálu Comax-1

Na obr. 3-11 je znázorněna ojedinělá částice o velikosti 7 µm. Analýza dokládá, že chemické složení tohoto vměstku je na bázi Bi-Al-Si-O-F. Obr. 3-12 ukazuje komplexní fázi s vysokým obsahem Al a Cu a obsahem kyslíku 7 wt %.

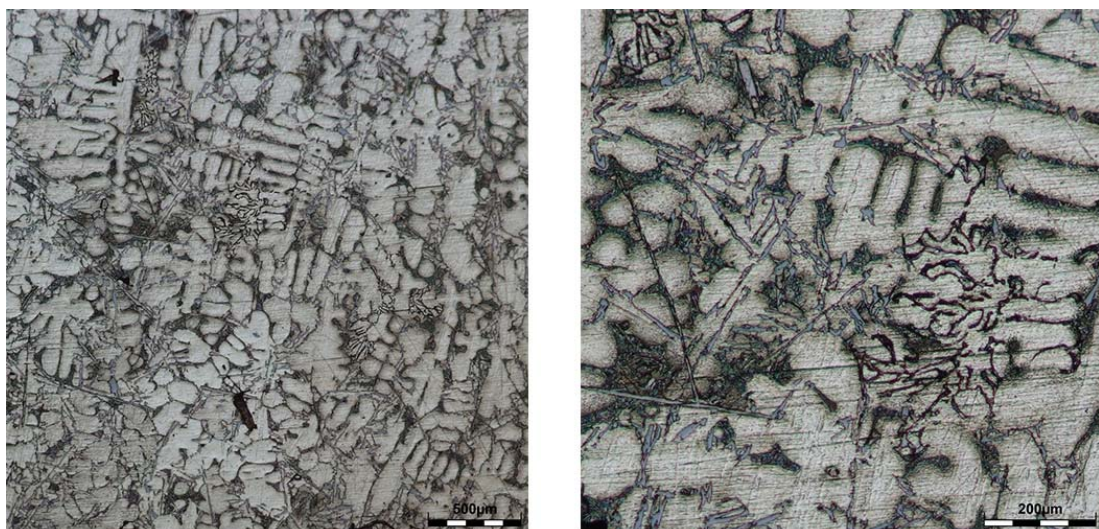


Obr. 3-11 Analýza intermetalických fází ve struktuře materiálu Comax-2



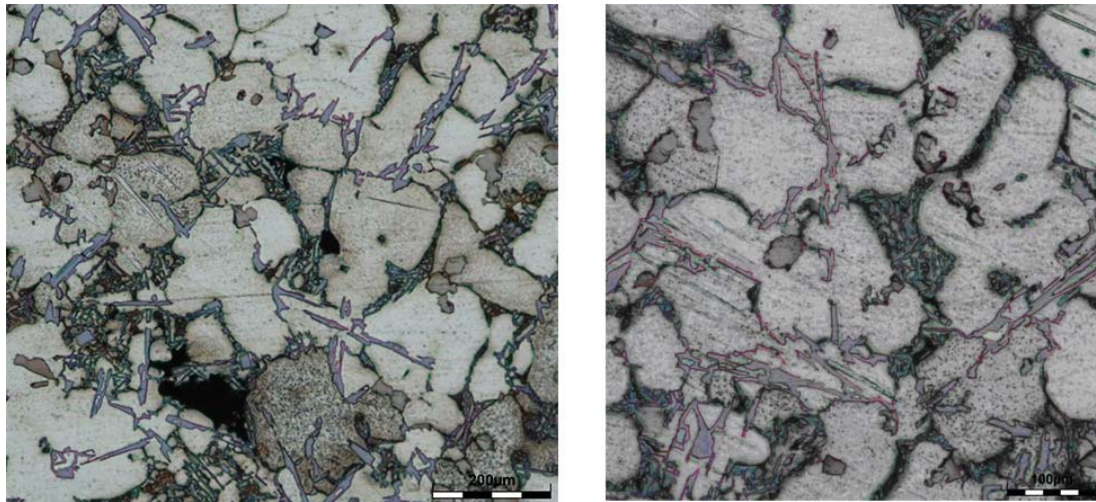
Obr. 3-12 Analýza intermetalických fází ve struktuře materiálu Comax-3

Mikrostrukturu z optického mikroskopu materiálu *Martin Metals* ukazuje obr. 3-13. Na tomto snímku lze pozorovat strukturu tvořenou tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$ a eutektikem. Železo je přítomno jednak ve formě jehlic β -fáze, jednak v podobě útvarů α -fáze. Útvary α -fáze jsou detailněji zobrazeny na obr. 3-13 (vpravo).



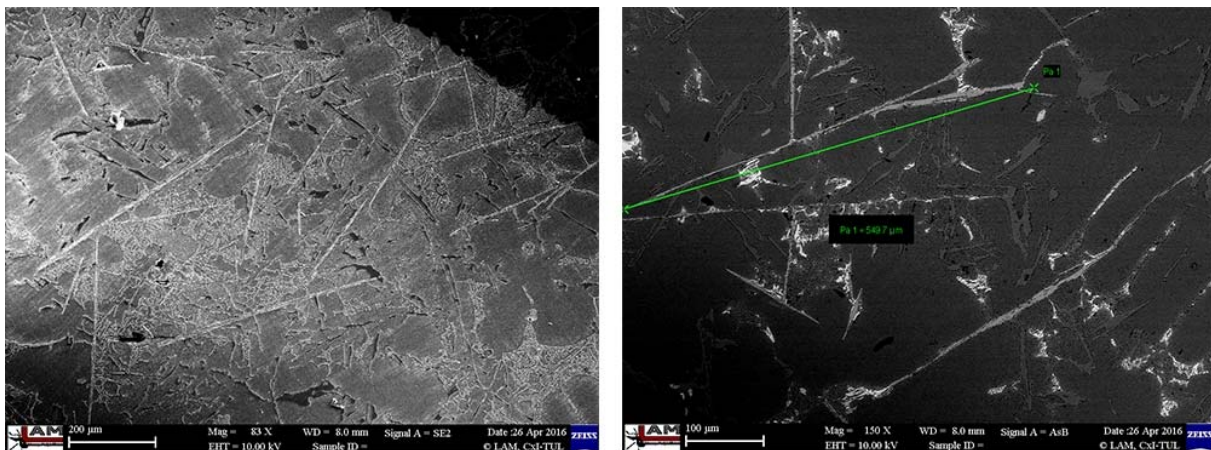
Obr. 3-13 Struktura materiálu Martin Metals (vpravo přiblížení)

Na obr. 3-14 se vyskytují póry (útvary černé barvy). Jednotlivé útvary základní matrice mají různou barvu, což svědčí o značné heterogenitě jejich chemického složení. Dále se zde vyskytují šedě zbarvené kompaktní ostrohranné útvary kalové fáze o velikosti přibližně 50 μm .

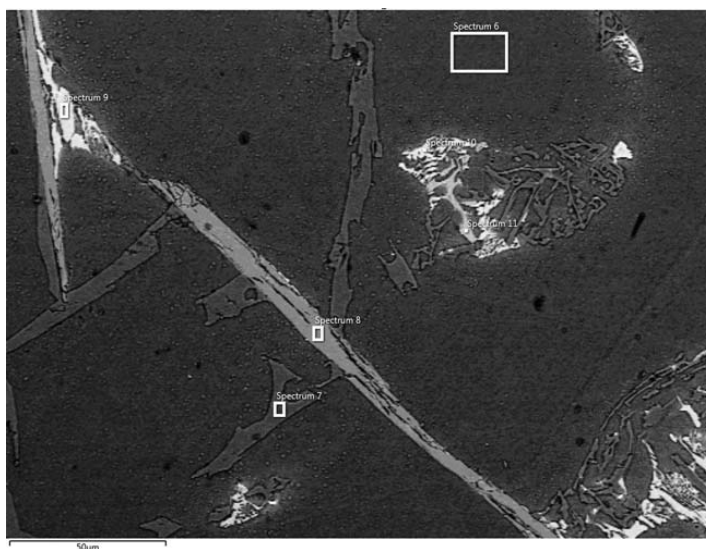


Obr. 3-14 Struktura materiálu Martin Metals s kalovou fází a poretitou

Z analýzy mikrostruktury a chemického složení jednotlivých intermetalických fází u vzorků materiálu Martin Metals na elektronovém mikroskopu, (obr. 3-15, obr. 3-16), je patrné velké množství dlouhých jehlic β -fáze s délkou dosahující 550 μm .



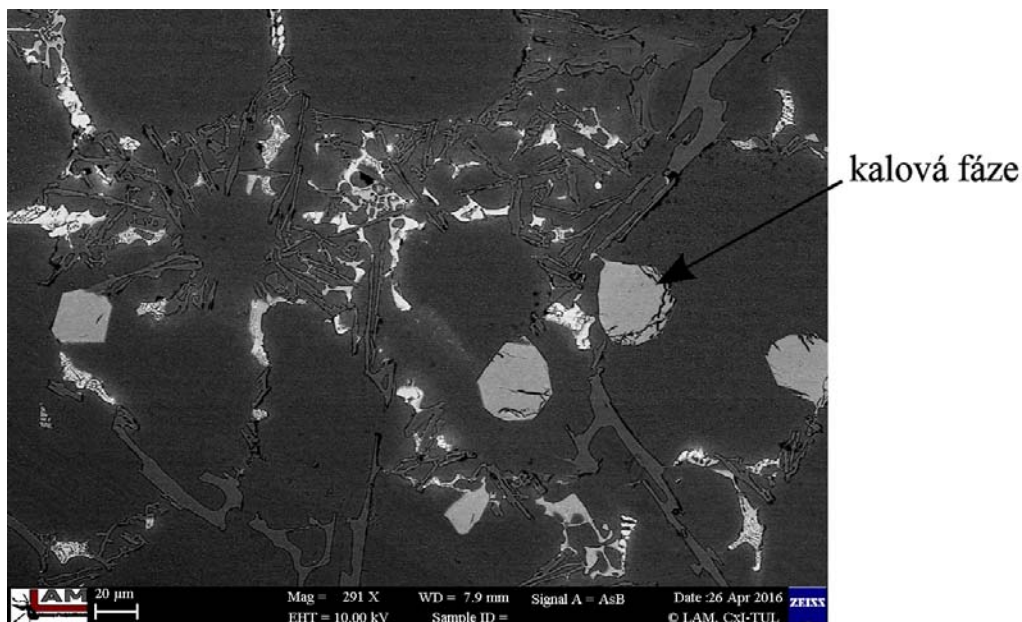
Obr. 3-15 jehlice β -fáze ve struktuře materiálu Martin Metals



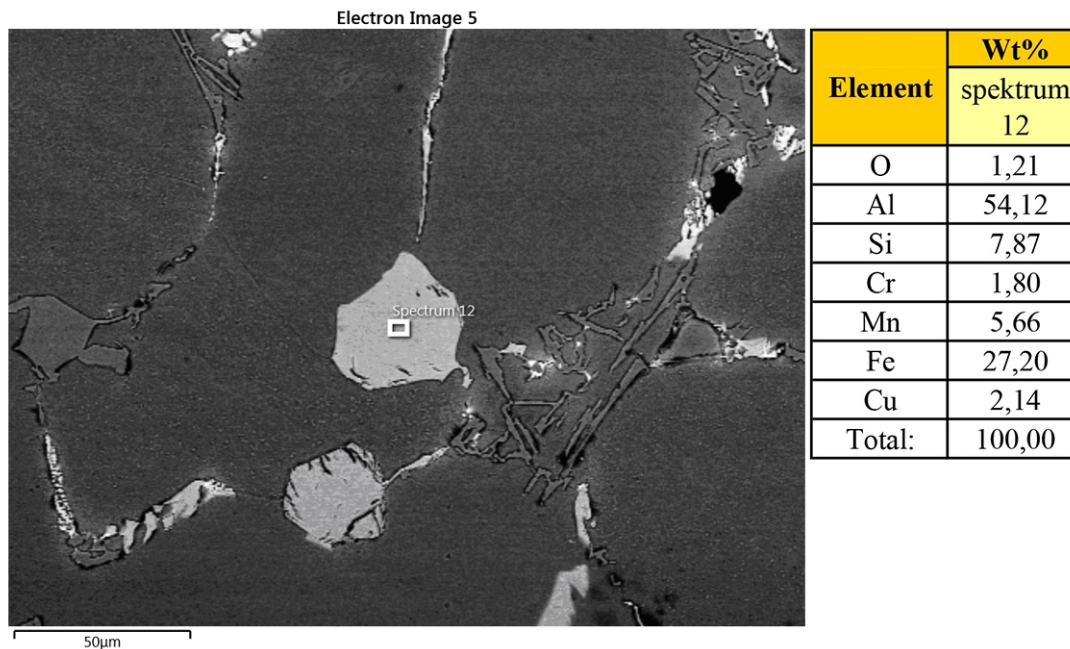
Element	Wt%		
	spektrum 8	spektrum 9	spektrum 11
O	1,10	1,38	7,60
Al	52,49	44,68	35,71
Si	14,40	2,20	5,37
Cu		48,66	27,80
Zn			
Mn	1,56		1,93
Fe	30,45		13,97
Ni		3,27	5,58
F			1,80
S			0,41
Ca			0,38
Total:	100,00	100,00	100,00

Obr. 3-16 Analýza intermetalických fází ve struktuře materiálu Martin Metals-1

Obr. 3-16 ukazuje další intermetalické fáze, jedná se o bíle zbarvené útvary na bázi Al-Cu (spektrum 9) a fázi s komplexním chemickým složením na bázi Al-Cu-Fe-O-Ni (spektrum 11). Ve struktuře materiálu se vyskytovaly také polyedrické částice, jejichž analýzou bylo zjištěno, že se jedná o částice bohaté na Al (54 wt %) a Fe (27 wt %) na bázi Al-Fe-Si-Mn, tzv. kal. Velikost těchto útvarů je zhruba 50 μm . U bíle zbarvených útvarů na obr. 3-17 se jedná o částice s vysokým obsahem Cu.



Obr. 3-17 Kalové fáze ve struktuře materiálu Martin Metals



Obr. 3-18 Analýza intermetalických fází ve struktuře materiálu Martin Metals-2

3.3. Hodnocení vlivu doby odplyňování na kvalitu taveniny

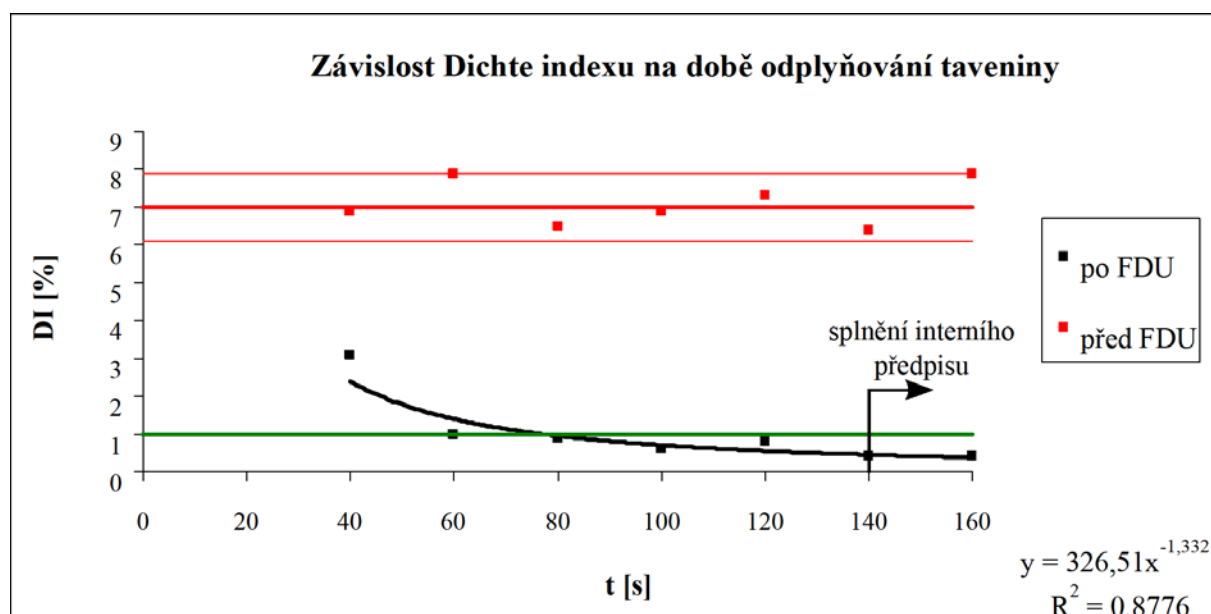
Tavba vsázky ve druhé fázi experimentu proběhla dle postupu popsaného v kapitole 3.1. K zařízení FDU byly postupně zaváženy transportní pánve s taveninou, ze kterých byly po

odplyňování odebírány vzorky pro vyhodnocení Dichte indexu. Zkoušky na přístroji Vacuum Density Tester probíhaly dle postupu uvedeného v kapitole 3.1.

Výsledné hodnoty indexu hustoty při různých časech odplyňování taveniny jsou uvedeny v tab. 3.4. Po přelití taveniny z tavicí pece do transportního kelímku, tj. před rafinací a odplyňováním, byly průměrná hodnota Dichte indexu $DI = (7,0 \pm 0,9) \%$. Počáteční doba odplyňování na zařízení FDU byla nastavena na 40 s. Následně se tento čas navyšoval po 20 s až do 160 s, což je v tavně běžně používaná doba odplyňování taveniny.

Tab. 3.4 Hodnoty DI pro různé časy odplyňování

číslo vzorku	DI [%]						
	40 s	60 s	80 s	100 s	120 s	140 s	160 s
1	2,34	1,24	0,87	0,78	0,75	0,37	0,37
2	3,50	1,12	1,10	0,75	0,75	0,37	0,37
3	2,64	0,95	0,78	0,37	1,87	0,37	0,38
4	2,89	0,87	0,78	0,75	1,12	0,75	0,37
5	2,64	0,96	1,05	0,37	0,75	0,37	0,34
6	4,30	1,21	0,87	0,37	0,39	0,37	0,37
7	2,96	1,14	1,05	1,12	0,75	0,78	0,74
8	3,22	1,12	0,78	0,37	0,45	0,37	0,37
9	3,14	0,95	0,78	0,78	0,75	0,37	0,37
10	3,45	0,87	0,75	0,78	0,78	0,37	0,37
průměrná hodnota DI	3,1	1	0,9	0,6	0,8	0,4	0,4
směrodatná odchylka	0,5	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1

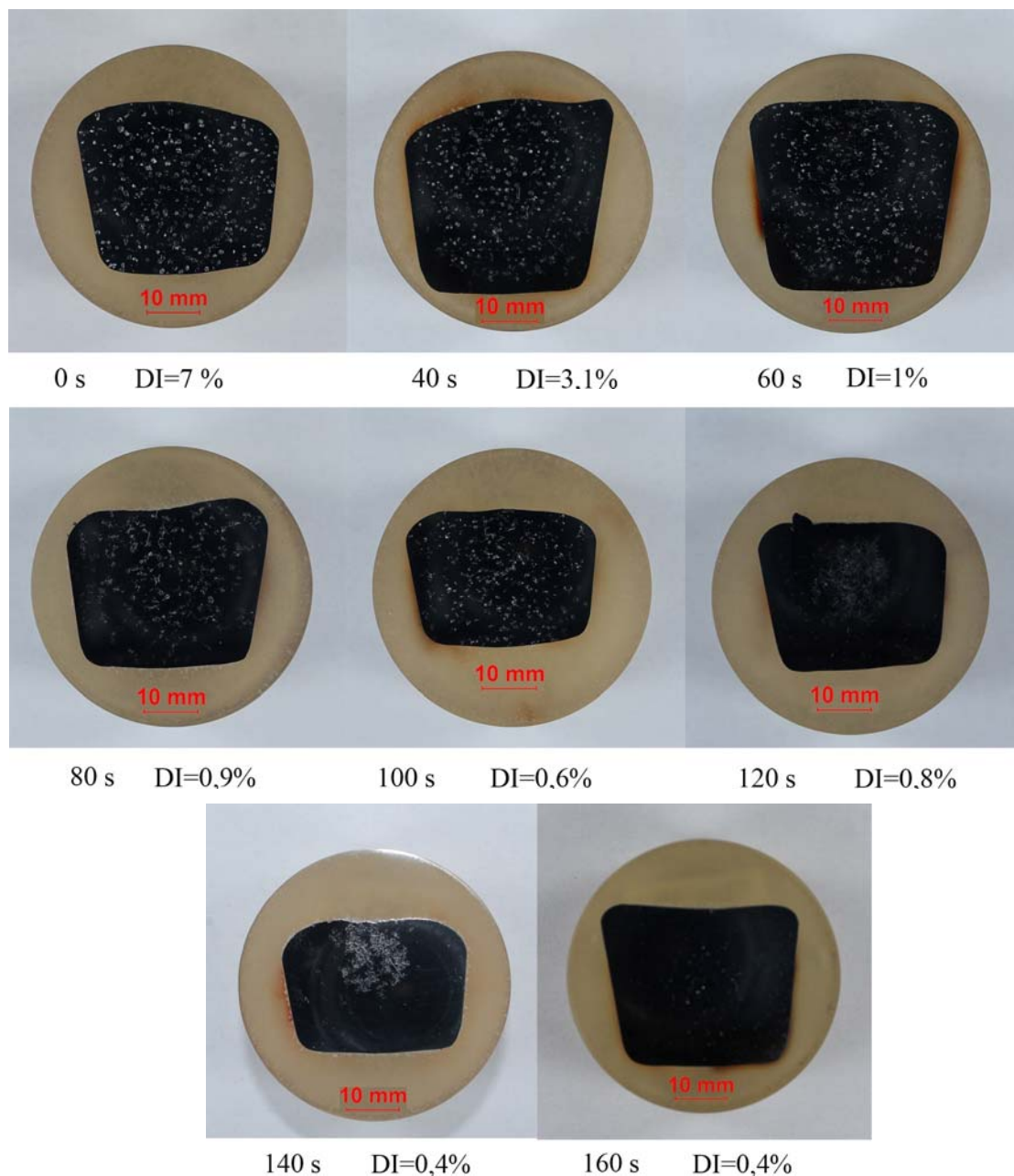


Obr. 3-19 Závislost DI na času odplyňování taveniny

Z grafické závislosti uvedené na obr. 3-19 je zřejmé, že hodnoty DI klesají s rostoucím časem odplyňování. Od času odplyňování 80 s je průměrná hodnota DI nižší než 1 % (interní předpis). Některé naměřené hodnoty DI pro časy odplyňování 80 s až 120 s však dosahovaly hodnoty vyšší než

je interní předpis. Hodnoty DI nižší než 1 % u všech vzorků bylo dosaženo až u času odplyňování taveniny 140 s. Pro tento čas je už splnění interního předpisu spolehlivě zajištěno.

Následně byly vzorky (ztuhlé ve vakuu) pro jednotlivé časy odplyňování rozříznuty a vybroušeny dle postupu uvedeného v kapitole 3.2, viz obr. 3-20. Z obr. 3-20 je patrné, že s rostoucí dobou odplyňování taveniny se účinnost procesu zvyšuje a tavenina obsahuje méně bublin vodíku. Od času 100 s se již hodnota DI tolik neměnila, což odpovídá i podobnému množství bublin na těchto vzorcích. Vzhledem k tomu, že množství vyloučených bublin vodíku závisí i na velikosti vzorku, resp. době tuhnutí, je toto porovnání vzorků spíše orientační.



Obr. 3-20 Vzorky metody dvojího vážení ztuhlé ve vakuu pro různé časy odplyňování

4. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vyhodnocení metalurgické čistoty slitiny AlSi8Cu3 s ohledem na dobu odplyňování taveniny. Tato práce probíhala ve spolupráci se slévárnou KSM Castings a.s. Práce je složena ze dvou částí, teoretické a experimentální.

V teoretické části jsou popsány druhy slévárenských slitin hliníku, způsob jejich značení a mechanické vlastnosti. Další kapitola je věnována metalurgii slitin hliníku, která popisuje typy tavicích pecí, typy vsázkového materiálu a problémy vznikající při tavení, tedy naplynění taveniny a obsah vměstků. Zde jsou také popsány zdroje vodíku v tavenině a metody ošetření taveniny, které množství vodíku v tavenině snižují. Samostatná kapitola je věnována provozním metodám kontroly čistoty taveniny, které slouží k hodnocení stupně naplynění taveniny a obsahu vměstků.

Experimentální část práce popisuje experiment, který byl rozdělen do dvou fází. V rámci první fáze se provádělo hodnocení kvality vstupního materiálu od dvou dodavatelů vybrané slitiny. Výběr právě těchto dodavatelů, z celkového počtu dvanácti dodavatelů slitiny AlSi8Cu3, byl dán na základě zkušeností s kvalitou materiálu od těchto dodavatelů. V této fázi experimentu bylo provedeno měření Dichte indexu a také odlity vzorky Drosstestu, které měli poskytovat představu o množství vměstků v tavenině. Hodnota Dichte indexu vyšla pro oba druhy vstupního materiálu velmi podobná. U vzorku Drosstestu materiálu Martin Metals však byla zjištěna i po rafinaci přítomnost vměstků a oxidických plen. Při metalografickém hodnocení byla navíc u tohoto materiálu zjištěna přítomnost jehlic β -fáze (dosahující délky 600 μm) a kalové fáze.

Druhá fáze experimentu vyhodnocovala vliv doby odplyňování na kvalitu taveniny bez ohledu na konkrétního dodavatele pro ve slévárně běžně používaný poměr vsázky 60 % vratu a 40 % nových housek. Pro hodnocení této fáze experimentu se využilo metody dvojího vážení. Průměrná hodnota Dichte indexu před rafinací taveniny vycházela $DI = (7,0 \pm 0,9) \%$, přičemž s postupným nárůstem doby odplyňování docházelo ke snižování obsahu vodíku, jak bylo patrné i na vzorcích z metody dvojího vážení po rozříznutí, u kterých se snižovalo množství vyloučených bublin vodíku.

Z výsledků první fáze experimentu bylo na základě zjištění vysokého obsahu nečistot, tj. přítomnosti kalových fází a jehlic β -fáze, rozhodnuto o vyřazení materiálu Martin Metals ze skupiny dodavatelů slitiny AlSi8Cu3.

U druhé fáze experimentu bylo při hodnocení vlivu doby odplyňování na naplynění taveniny zjištěno, že průměrné hodnoty Dichte indexu menší než stanovuje interní předpis tavrny, tj. $DI = 1 \%$, se docílí již při čase odplyňování 80 s. Aby ovšem bylo v sériové výrobě zajištěno, že Dichte index taveniny bude opakovaně splňovat interní předpis, lze na základě výsledků experimentu doporučit čas odplyňování 140 s. Při tomto čase odplyňování už všechny vyhodnocované vzorky měly hodnotu DI menší jak 1 %, což garantuje spolehlivost dodržení interního předpisu. Při nižších časech totiž byla u některých vzorků tato hodnota DI překročena. Slévárně tak lze doporučit snížení doby odplyňování taveniny z nyní používaného času odplyňování 160 s na čas 140 s. Z hlediska dalšího snížení doby

odplyňování by bylo zajímavé vyhodnotit Dichte index pro čas 130 s a stanovit, zda by i pro tento čas byl spolehlivě splněn interní předpis tavírny.

5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] Firemní materiály firmy KSM Castings CZ a.s., Hrádek nad Nisou, 2016.
- [2] Slévárství - teorie. *Návody k laboratorním pracím* [online]. Praha, 2008 [cit. 2016-06-29]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_slevarenstvi/teorie.htm
- [3] JANOVEC, J., K. MACEK a P. ZUNA. *Fyzikální metalurgie* [skripta]. 1. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2.
- [4] MACEK, K. a P. ZUNA. *Nauka o materiálu* [skripta]. 1. Praha: ČVUT, 1999. ISBN-80-01-01507-6.
- [5] MICHNA, Š. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s. r. o., 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [6] MURGAŠ, M. *Teória zlievarenstva* [skripta]. 1. Bratislava: STU, 2002. ISBN 80-227-1684-7.
- [7] VALECKÝ, J. a kol. *Lití kovů pod tlakem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [8] RAGAN, E. a kol. *Liatie kovov pod tlakom*. Prešov: Vydavateľstvo Michala Vaška, 2007. ISBN-978-80-8073-979-9.
- [9] *Redukce nákladů v období ekonomické a finanční krize, technologie, metalurgie, metalurgická kvalita a metalografie slitin neželezných kovů*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009. ISBN 978-80-02-02148-3.
- [10] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin* [skripta]. Akademické nakladatelství Cerm, Brno, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [11] ZEMČÍK, L. Vodík ve slitinách hliníku. *Slévárství*. 2012, LX(5-6), 154-158. ISSN 0037-6825.
- [12] NĚMEC, M., B. BRYKSÍ STUNOVÁ a B. BEDNÁŘ. *Teorie slévání* [skripta]. Praha: nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [13] *Mk Industrievertretungen GmbH Al-Schmelze-Messtechnik: Produktový katalog*. Stahlhofen a. W., Deutschland, 2016.
- [14] *Shape Casting: Fourth International Symposium 2011* [online]. Wiley-TMS, 2011 [cit. 2016-05-13]. ISBN 978-1-118-02937-4.
- [15] FMA Mechatronic Solutions AG. : *Aluminium test units*. Schaan Liechtenstein, 2016.
- [16] *SCHÄFER Chemische Fabrik GmbH*. Hennef/Sieg (Germany), 2016.