

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Změna kvality slitiny hliníku v závislosti na délce přítomnosti  
v udržovací peci

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Bc. Simonu ŠROMOVOU

Program: Strojní inženýrství

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Změna kvality slitiny hliníku v závislosti na délce přítomnosti v udržovací peci

Název anglicky: Decreasing of Al alloy quality according to the duration of holding in furnace

### Zásady pro vypracování:

1. Úvod do metalurgie slitin hliníku
2. Vybrané zkoušky kvality taveniny slitin hliníku
3. Experiment zjišťování kvality taveniny v závislosti na délce přítomnosti v udržovací peci
4. Vyhodnocení experimentu
5. Závěry a doporučení



## **Čestné prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia fakulty strojní ČVUT v Praze.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne: .....

Podpis: .....

## **Poděkování**

Ráda bych na tomto místě poděkovala vedoucí diplomové práce Ing. Barboře Bryksí, Ph.D. za věcné připomínky a odbornou pomoc, kterou mi byla nápomocna při vypracování této práce.

Dále bych ráda poděkovala konzultantovi Ing. Milanovi Luňákovi a celému oddělení technologie z firmy Beneš a Lát, a.s. za obětavé jednání, poskytnutí materiálů potřebných pro vytvoření této diplomové práce a umožnění realizace experimentální části.

V neposlední řadě děkuji Ing. Tomášovi Kramárovi, Ph.D. za pomoc při vypracování experimentální části.

## **Anotace**

Teoretická část shrnuje poznatky o hliníkových slitinách, především o siluminech. Zabývá se tavením vybraných slitin, jejich ošetřením a metalurgickými procesy taveniny. Dále jsou teoreticky popsány metody zjišťování kvality taveniny. V experimentální části jsou pomocí metod spektrální analýzy, Drosstestu, Dichte Indexu a zkoušky zabíhavosti sledovány faktory ovlivňující kvalitu natavené slitiny. Kvalita taveniny je sledována v závislosti na čase v udržovací peci na dvou vybraných slitinách (AlSi10Mg a AlSi7Mg0,3). Nejprve materiálu nataveného ze 100 % housek, poté s 40 % vratného materiálu. Tavenina byla před nalitím ošetřena pomocí odplynovacího zařízení.

### **Klíčová slova**

slitiny hliníku, siluminy, tavení slitin hliníku, rafinace taveniny, Straube - Pfeifer test, Drosstest, Dichte Index, spektrální analýza, termická analýza, zkouška zabíhavosti

## **Annotation**

The theoretical part summarizes the findings of aluminum alloys, mainly Al-Si. It deals with selected melting alloys, their treatment and metallurgical processes inside the melt. Furthermore are theoretically described methods for determining the quality of the melt. In the experimental are monitored factors affecting the quality of the molten alloy part by methods of spectral analysis, Drosstest, Dichte Index and fluidity tests. The quality of the melt was monitored in relation to time in a holding furnace at two selected alloys (AlSi10Mg a AlSi7Mg0,3). First, molten material of 100% rolls then with 40 % recycled material. Before pouring the melt was treated by means of degassing equipment.

### **Key words**

Aluminium alloys, silumin, melting aluminium alloys, refining melt, Straube - Pfeifer test, Drosstest, Dichte Index, spectral analysis, thermal analysis, fluidity test

## Seznam použitých symbolů a jednotek

Zkratka/Symbol	Popis	Jednotka
ČSN	Československé technické normy	
ČSN EN	Evropská norma	
DIN	Německá národní technická norma	
FDU	Foundry Degassing Unit	
$R_m$	Mez pevnosti	MPa
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	MPa
A	Tažnost	%
$T_{pL}$	Teplota přechlazení	°C
C	Rozpustnost plynu v kovu	cm <sup>3</sup> na 100 g kovu
Q	Energie rozpouštění	J
R	Plynová konstanta	J.K <sup>-1</sup>
T	Teplota	K
$\rho$	Hustota kovu a plynu	kg.m <sup>-3</sup>
$\eta$	Dynamická viskozita	kg.s <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup>
r	Poloměr bubliny	m
v	Rychlost vyplouvání bublin	m.s <sup>-1</sup>
$p_{H_2}$	Parciální tlak plynu v okolní atmosféře	Pa
S	Rozpustnost vodíku	cm H <sub>2</sub> (100 g Al)
$m_{vz\ atm}$	Hmotnost vzorku na vzduchu	g
$m_{vz\ H_2O}$	Hmotnost vzorku ponořeného ve vodě	g
$\rho_{H_2O}$	Hustota vody	g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{vz}$	Hustota kovu vzorku	g/cm <sup>3</sup>
$V_{H_2}$	Objem vyloučeného plynu	$\frac{m^3 H_2}{kg}\ Al$
DI	Dichte index (hodnota naplynění)	%
$Y_z$	Koeficient zabíhavosti	mm <sup>-1</sup>

## OBSAH

<b>ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ</b>	<b>3</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ</b>	<b>4</b>
<b>ANOTACE</b>	<b>5</b>
<b>ANNOTATION</b>	<b>5</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A JEDNOTEK</b>	<b>6</b>
<b>OBSAH</b>	<b>7</b>
<b>1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY</b>	<b>9</b>
1.1 Cíle práce	10
<b>2 SLITINY HLINÍKU</b>	<b>11</b>
2.1 Siluminy	11
2.2 Mechanické a technologické vlastnosti siluminů	12
2.3 Morfologie struktury siluminů	13
2.3.1 Pódeutektické slitiny	13
2.3.2 Eutektické slitiny	13
2.3.3 Nadeutektické slitiny	13
2.4 Rozdělení siluminů dle legujících prvků	14
2.4.1 Slitiny Al-Si	14
2.4.2 Slitiny Al-Si-Mg	14
2.4.3 Slitiny Al-Si-Cu	14
2.5 Přísadové prvky a nečistoty ve slitinách Al - Si	15
2.6 Mechanické, fyzikální a slévárenské vlastnosti vybraných slitin	17
2.6.1 AlSi10Mg (EN AC - 43 100)	17
2.6.2 AlSi7Mg0,3 (EN AC-42 100)	18
<b>3 PŘÍPRAVA TAVENINY PŘED ODLÉVÁNÍM</b>	<b>19</b>
3.1 Kvalita housek od výrobce	19
3.2 Tavení slitin hliníku	19
3.3 Rizika spojená s přípravou taveniny	20
3.3.1 Znehodnocení taveniny železem	20
3.3.2 Propal prvku Mg	21
3.4 Rozpustnost plynů	21
3.4.1 Vznik plynových dutin v odlitcích	21
3.5 Vměstky ve slitinách hliníku	23

<b>3.6</b>	<b>Rafinace taveniny</b>	<b>24</b>
3.6.1	Chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí	24
3.6.2	Odplynění taveniny	25
3.6.3	Filtrace taveniny	27
<b>4</b>	<b>OVLIVNĚNÍ MORFOLOGIE STRUKTURY</b>	<b>29</b>
4.1	Krystalizace eutektika	29
4.1.1	Očkování před krystalizací eutektika	30
4.1.2	Modifikace	31
<b>5</b>	<b>NÁSTROJE K HODNOCENÍ KVALITY TAVENINY</b>	<b>34</b>
5.1	Měření naplynění	35
5.2	Drosstest	36
5.3	Straube – Pfeiffer Test	36
5.4	Zkouška zabíhavosti	37
5.5	Spektrometrie	38
5.6	Termická analýza	39
	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI</b>	<b>42</b>
6.1	Průběh experimentální části	43
6.2	Popis principu odběru vzorků pro jednotlivé zkoušky	44
6.2.1	Dichte index	44
6.2.2	Spektrální analýza	44
6.2.3	Drosstest	45
6.2.4	Zkouška zabíhavosti	46
6.3	Naměřené hodnoty jednotlivých zkoušek	47
6.3.1	Spektrální analýza	47
6.3.2	Drosstest	52
6.3.3	Dichte Index	58
6.3.4	Zabíhavost	60
<b>7</b>	<b>DOPORUČENÍ PRO PRAXI</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>70</b>



## 1 Úvod do problematiky

Hliník a jeho slitiny jsou v dnešní době nejvyužívanější slitiny z neželezných kovů. V posledních letech je celosvětově zaznamenáván růst výroby hliníkových odlitků o 9,9 % což má vliv na celkovou světovou produkci čítající přes 15,3 milionů tun odlitých odlitků ze slitin hliníku.<sup>1)</sup> Nejširší uplatnění nacházejí v automobilových komponentech, kde podíl všech vyrobených odlitků v Evropě čítá 37 %.

Ve slévárenství se nejvíce používají slitiny hliníku typu Al-Si vzhledem k jejich optimálním metalurgickým a užitným vlastnostem. Dobré slévárenské vlastnosti vykazují podeutektické siluminy s obsahem křemíku do 11 %, nejlepší pevnostní vlastnosti mají eutektické siluminy s vyšším obsahem křemíku (do 13 %). Nejvyšší dosažitelnou tvrdostí vynikají siluminy nadeutektické s obsahem křemíku nad 14 %. Vlastnosti odlitků vyrobených z těchto slitin jsou výrazně ovlivněny nejen technologickým postupem výroby, ale také kvalitou materiálu. Technologický postup výroby zahrnuje vše od konstrukce odlitku a formy, přes tavení a metalurgii, až po způsob lití a tepelné zpracování.

Výsledná kvalita materiálu je kromě vstupního materiálu ovlivněna metalurgickými procesy ve slévárně. Kvalita taveniny v závislosti na délce udržování v elektrické odporové kelímkové peci je předmětem experimentu této práce, která vznikla ve spolupráci s firmou Beneš a Lát, a.s.

Jsou zkoumány dvě slitiny (AlSi10Mg a AlSi7Mg0,3) a to především z důvodu nejvyššího výskytu odlévaných odlitků právě z těchto slitin. Vsázka je v různém poměru tvořena čistými houskami a vratným materiálem, a to ze 100 % housek v jednom případě a ze 40 % vratného materiálu a 60 % čistých housek v druhém experimentálním materiálu. Před samotným nalitím materiálu do udržovacího kelímku jsou obě slitiny a oba typy materiálu odplyněny pomocí rotačního odplyňovacího zařízení. Experiment sleduje změny kvality materiálu v průběhu dvanácti hodin za pomoci přístrojů spektrální analýzy, Drosstestu, zkoušky zabíhavosti a zkoušky se zjištěním hodnoty naplynění tzv. Dichte indexu. Principy těchto zkoušek jsou blíže popsány v teoretické části.

---

<sup>1)</sup> Zdroj: Steady growth in global output: a modern casting staff report. *Modern Casting* [online]. 2014, č. 12, s. 17-21 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://content.yudu.com/web/y5b2/0A1snzj/ModCastingDec2014/flash/resources/18.htm>

## 1.1 Cíle práce

- Uvést do problematiky metalurgie slitin hliníku
- Teoreticky podložit provedený experiment a popsat princip vybraných zkoušek použitých ke zjišťování kvality taveniny
- Experimentálně zjistit kvalitu taveniny v závislosti na délce přítomnosti v udržovací peci
- Vyhodnotit experiment
- Vyvodit závěry a vhodná doporučení

## 2 Slitiny hliníku

Mechanické vlastnosti čistého hliníku jsou nevyhovující, proto se pro výrobu odlitků používají slitiny hliníku, které jsou obohaceny přísadovými prvky, tzv. legurami. Jejich množství a vzájemná kombinace ovlivňuje výsledné mechanické i technologické vlastnosti. Slitiny hliníku lze rozdělit na základě jejich chemického složení. Další důležitou skupinou prvků jsou tzv. hlavní přísadové prvky, na základě kterých se slitiny hliníku rozdělují:

- slitiny Al – Si, tzv. siluminy
- slitiny Al – Cu, tzv. duralumina
- slitiny Al – Mg, tzv. hydronalia
- slitiny Al – Zn, tzv. zinkové siluminy

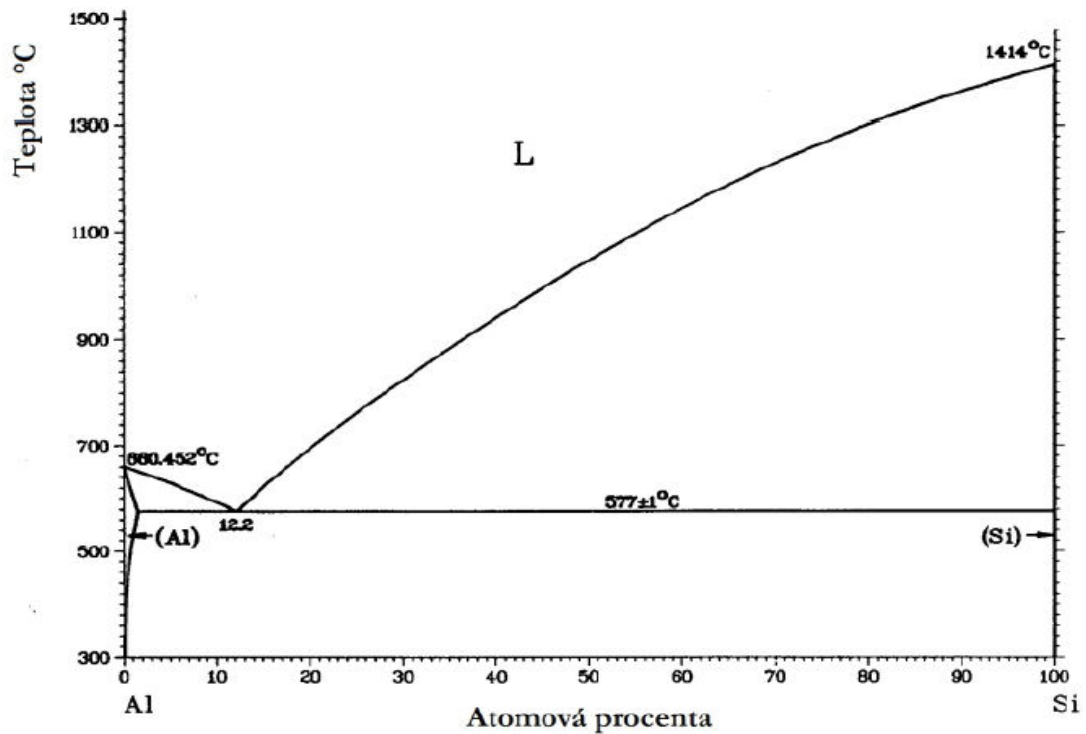
Vedlejší přísadové prvky jsou zastoupeny v menším procentuálním množství v porovnání s hlavními přísadovými prvky, ale ovlivňují některé z hlavních předností daného typu slitiny, např. slévateľnost, obrobitelnost, a také snižují negativní vliv některých doprovodných prvků. Doprovodné prvky, jsou takové prvky, které jsou ve slitině obsaženy bez záměrného přidání a lze je zařadit mezi nečistoty. Původem nečistot mohou být vsázkové suroviny, vyzdívka pece, anebo také nečistoty z nářadí, které přichází do styku s taveninou. Podle počtu přísadových prvků se slitiny rozdělují: [1]

- binární – obsahují pouze základní a hlavní přísadový prvek
- ternární – kromě základního a hlavního přísadového prvku obsahují navíc jeden vedlejší přísadový prvek
- vícesložkové – obsahují několik vedlejších přísadových prvků

### 2.1 Siluminy

Slitiny Al-Si jsou polykomponentní slévářenské slitiny - nejvýznamnější slévářenské slitiny hliníku. Jsou určeny k výrobě tvarových odlitků gravitačním litím do písku, do kovových forem, nebo tlakově. Kromě základních prvků, hliníku a křemíku, obsahují další doprovodné prvky jako hořčík, měď, železo a mangan, které jsou procentuelně zastoupeny v závislosti na chemickém složení dané slitiny.

Soustavu Al-Si charakterizuje rovnovážný diagram s teplotou eutektické přeměny ( $577\pm 1$  °C) o eutektické koncentraci 12,2 % Si. [2]



Obr. 1 Binární fázový diagram Al-Si [3]

## 2.2 Mechanické a technologické vlastnosti siluminů

Obecně řečeno mají siluminy dobré slévárenské vlastnosti, které se odvíjejí od obsahu křemíku - čím větší je obsah křemíku ve slitině, tím lepší jsou její slévárenské vlastnosti. Rostoucí podíl křemíku až do eutektického obsahu zmenšuje interval tuhnutí a díky tomu se zlepšuje většina slévárenských vlastností, především zabíhavost. [1]

Mechanické vlastnosti binárních slitin jsou průměrné. Proto za použití přísadových prvků (Cu a Mg) s vyšší rozpustností v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$  lze dosáhnout vyšších pevnostních hodnot. Tažnost slitin Al-Si závisí především na morfologii eutektického křemíku a lze jí zvýšit pomocí modifikace. Modifikací lze zlepšit i obrobitelnost, která je u binárních slitin jen střední. [1]

Nebinární siluminy vykazují vyšší pevnostní vlastnosti a proto jsou používány pro odlévání tvarově složitějších dílů (např. skříně spalovacích motorů a převodovek, písty a hlavy válců). Dobrých mechanických vlastností slitin, je docíleno přidáním přísadových prvků (Cu a Mg), které mají vyšší rozpustnost v tuhém roztoku  $\alpha$  a umožňují vytvrzení slitin. Z toho důvodu jsou slitiny Al-Si-Cu a Al-Si-Mg často používané. Dále je možné tyto slitiny dlouhodobě mechanicky zatěžovat a to až do teplot 270°C. Výborných slévárenských vlastností lze docílit přidáním dalších prvků (Mn, Ti, Zn, Ni). [5] [6]

## 2.3 Morfologie struktury siluminů

Slitiny Al-Si tuhnou podle binárního diagramu Al-Si (zobrazený na obr. 1). Struktura a vlastnosti siluminů se odvíjejí od křemíku obsaženého ve slitině. Na základě obsahu křemíku se slitiny dělí na:

- podeutektické – obsahují vždy více než 2 % Si, nejčastěji však mezi 7 a 11 % Si
- eutektické – obsahují přibližně 11,5 – 13 % Si
- nadeutektické – obvyklý obsah je kolem 14 – 17 % Si, výjimečně až 25 % Si

### 2.3.1 Podeutektické slitiny

Struktura podeutektických slitin je tvořena primárními dendrity fáze  $\alpha(\text{Al})$  a eutektikem, které se vylučuje v mezidendritických prostorech. [1] Mezi nejpoužívanější slitiny z této skupiny lze uvést tyto slitiny  $\text{AlSi5}$ ,  $\text{AlSi7MgMn}$ ,  $\text{AlSi9Cu3}$ ,  $\text{AlSi10Mg}$  a jejich případné modifikace. [8] Podeutektické slitiny se používají pro středně namáhané odlitky. Vzhledem k nižší zabíhavosti jsou voleny jako materiál méně složitých dílů za použití technologie lití do písku, nebo i nízkotlakého odlévání. Nevýhodou těchto slitin je jejich sklon k tvorbě trhlin za tepla.

### 2.3.2 Eutektické slitiny

Struktura eutektických slitin je tvořena pouze eutektikem s náhodným výskytem jednotlivých dendritů fáze  $\alpha(\text{Al})$ . Vyznačují se vysokou zabíhavostí a sklonem k soustředěným staženinám, což je výhodné z hlediska nálitkování. Zároveň vynikají vysokou pevností a dobrou tažností. [2] Používají se pro tvarově složitě díly a tenkostěnné odlitky vyráběné technologií tlakovým litím a litím do kovových forem. Široké uplatnění nacházejí v automobilovém a leteckém průmyslu, jako například pro výrobu rotorů a kompresorů. Nejpoužívanějšími eutektickými slitinami jsou  $\text{AlSi12}$ ,  $\text{AlSi12Cu}$ ,  $\text{AlSi12Mn}$  a také komplexní pístová slitina  $\text{AlSi12NiCuMg}$ . [3] [7]

### 2.3.3 Nadeutektické slitiny

Struktura těchto slitin je charakteristická vyloučeným primárním křemíkem v hrubých polyedrických útvarech v eutektiku  $\alpha(\text{AlSi})$ . Se zvyšujícím se obsahem křemíku se zlepšují slévárenské vlastnosti, jako je zabíhavost, ale také pevnostní vlastnosti. Tyto slitiny se vyznačují nízkým koeficientem tepelné roztažnosti a vysokou oteřuvzdorností, proto nacházejí uplatnění pro výrobu kluzných součástí a odlitků pracujících za vysokých teplot (např. speciální písty). Mezi nejpoužívanější nadeutektické slitiny patří  $\text{AlSi20Cu2NiMgMn}$  a např. pístová slitina  $\text{AlSi25CuNiMg}$ . [1] [3]

## 2.4 Rozdělení siluminů dle legujících prvků

Siluminy z hlediska legujících prvků je možné rozdělit do dvou základních skupin:

- binární siluminy (jednoduché slitiny Al-Si)
- nebinární siluminy (slitiny Al-Si obsahující jeden či více vedlejších přísadových prvků)

### 2.4.1 Slitiny Al-Si

Jedná se o binární slitiny. Struktura je tvořena tuhým roztokem  $\alpha(\text{Al})$  a eutektikem, jehož podíl udává procento křemíku obsažené ve struktuře. Tyto slitiny mají vhodné slévárenské vlastnosti, vyznačují se vysokou zabíhavostí, nízkým sklonem k tvorbě staženin a odolností proti tvorbě trhlin za tepla. Odlitky vyrobené z těchto slitin jsou těsné vůči plynům a kapalinám a lze je pájet a svařovat. Mezi nejčastěji používané slitiny patří AlSi9, AlSi11, AlSi12. [2] [7]

### 2.4.2 Slitiny Al-Si-Mg

Jsou to podeutektické slitiny, kde je hořčík obsažen v množství 0,25 – 0,45 %, u některých typů je obsah hořčíku 0,5 - 0,7 % (např. u AlSi7Mg0,6, AlSi10Mg a AlSiMgTi). [2] Tyto slitiny mají v litém stavu jen průměrné vlastnosti, vysoké mechanické vlastnosti získají až po vytvrzení, avšak po vytvrzení se oproti litému stavu mírně snižuje tažnost. Slitiny s vyšším obsahem Si (např. AlSi10Mg) mají lepší slévárenské vlastnosti a lepší svařitelnost. Jsou vhodné pro technologii gravitačního lití do písku a do kovových forem, tak i pro lití pod tlakem. Odlitky z těchto slitin nacházejí uplatnění pro vysoce namáhané výrobky automobilového i leteckého průmyslu. [1]

### 2.4.3 Slitiny Al-Si-Cu

V této skupině jsou podeutektické (výjimečně až eutektické) slitiny doplněné o 1 – 5 % Cu. Přítomnost Cu ve struktuře zlepšuje mechanické vlastnosti (zvyšuje pevnost, tvrdost, obrobitelnost) a také umožňuje samovolné vytvrzení za studena. Tyto slitiny mají výborné pevnostní vlastnosti při zvýšených teplotách do 200°C. [2] Vzhledem k širokému intervalu krystalizace, mají tyto slitiny horší slévárenské vlastnosti (zejména menší zabíhavost, větší sklon k tvorbě trhlin za tepla a zvýšenou mikroporozitu v odlitcích) v porovnání se slitinami Al-Si. Měď má také negativní vliv na odolnost proti korozi, což je nežádoucí např. v automobilovém průmyslu. Typickým představitelem z této skupiny jsou slitiny AlSi8Cu3 a AlSi9Cu3. [1] [2]

## 2.5 Přísadové prvky a nečistoty ve slitinách Al - Si

### Hořčík

Hořčík je ve slitinách Al-Si důležitým prvkem, umožňuje vytvrzení za tepla. Ve slitinách je obsažen v množství 0,3 – 0,7 %. V tomto množství nemá prakticky žádný vliv na změnu slévárenských vlastností ani na odolnost proti korozi. V litém stavu má ale negativní vliv na tažnost. Ve vytvrzeném stavu je však jeho vliv velmi významný a to z hlediska zvýšení pevnosti. [1]

### Měď

Měď je nejběžnější přísadový prvek. Ve slitinách Al-Si zvyšuje pevnost a tvrdost a všeobecně zvyšuje obrobitelnost. Pro legování mědí se používají předslitiny AlCu. Při tuhnutí značně rozšiřuje interval tuhnutí a tím může podporovat vznik ředin za tepla. Do slitin se měď dostává především ze vsázkových surovin, zejména ze šrotu, který je mědí znečištěn. Snižuje tažnost a zhoršuje korozní vlastnosti, proto u slitin s nároky na vysokou korozní odolnost je obsah Cu limitován na nejnižší hodnoty (až 0,05 %Cu). [1]

### Železo

Železo je ve slitinách obvykle považováno za nečistotu do taveniny se dostává ze vsázkových surovin nebo rozpouštěním Fe z nenatřeného nářadí, kovových forem, zalitých Fe sítěk apod. V tuhém hliníku nemá železo téměř žádnou rozpustnost, a proto již při malém obsahu tvoří různé intermetalické fáze např.  $\alpha\text{AlFeMnSi}$  (označována podle tvaru jako „čínské písmo“). U běžných odlitků se připouští obsah Fe do 0,6 %, u vysokopevných odlitků pod 0,15 %Fe. Železo má negativní vliv na mechanické vlastnosti, avšak při rychlém chladnutí je negativní účinek Fe méně výrazný. [1]

### Mangan

Hlavním úkolem manganu ve slitinách Al-Si je kompenzace negativního vlivu Fe na mechanické vlastnosti. Již při obsahu 0,4 %Fe se doporučuje přidání Mn o ½ obsahu železa. Vzhledem ke kompenzačnímu účinku nepříznivých fází Fe se zvyšují mechanické vlastnosti a snižuje se křehkost slitin. U slitin s vyšším obsahem Fe, Mn a Cr a při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě vzniká tvrdá intermetalická fáze, tzv. kalová fáze, sludge. Vzniká sedimentací na dně kelímků udržovacích pecí ve formě těžko odstranitelných nárůstů. Kalové fáze zvyšují opotřebení licích strojů a kovových forem, snižují tekutost kovů a zhoršují obrobitelnost odlitků. [1]

### Vápník

Je jako doprovodný prvek, který se do slitinů dostává obvykle s křemíkem. Jeho obsah bývá v tisícinách procenta, při obsahu nad 50 ppm má vápník slabý modifikační účinek (který se prakticky nevyužívá). Vápník snadno reaguje s kyslíkem (snadno navlhá) a tím významně zvyšuje sklon k naplynění a tvorbě mikrostaženin. Je považován za nežádoucí prvek a je limitován maximální hodnotou 150 ppm. [1] [9]

### Fosfor

Fosfor je ve slitinách Al-Si běžně přítomen jako nečistota a jeho zvýšený obsah vede ke zhrubnutí eutektika. Zároveň má zásadní vliv na morfologii a uspořádání eutektického křemíku. Fosfor se do taveniny přidává jako očkovadlo primárního křemíku u nadeutektických slitin, kde částice fosfidu hlinitého AlP slouží jako krystalizační zárodky. Zrnité eutektikum vzniká při obsahu 5 – 10 ppm tvorbou krystalizačních zárodků AlP. Lamelární eutektikum vzniká v čistých slitinách s nízkým obsahem sodíku a s obsahem fosforu v rozmezí 1 – 2 ppm. Při modifikaci taveniny stronciem dochází k tzv. otrávení nukleačních zárodků AlP, což má za následek jejich deaktivaci a křemík je přinucen nukleovat při nižších teplotách a růst ve formě jemného, vláknitého eutektického křemíku s vysokou hustotou dvojčat. [9]

### Olovo

Olovo je ve slitinách Al považováno za významnou nečistotu z důvodu podpory vzniku mezikrystalické koroze, snížení houževnatosti, tažnosti tvárnosti a tepelné vodivosti. V hliníku nerozpustitelné a vytváří nízkotavitelné fáze. Na druhou stranu příznivě ovlivňuje obrobiteľnosť a lámavost třísky. Olovo je toxický prvek a od roku 2000 dle legislativních předpisů Evropského společenství 2000/53/EC je jeho obsah limitován. [9] [10]

### Cín

Cín byl do slitin Al přidáván za účelem zvýšení zabíhavosti, nyní se využívá pro snížení tření v ložiskách a pouzdech. Cín je alternativou olova ve slitinách určených pro tváření. Obsah cínu a forma jeho vyloučení je zásadní pro výsledné mechanické vlastnosti. Cín v hrubších útvarech negativně ovlivňuje především tažnost a houževnatost a také mez kluzu. Ve slitině AlSiMg0,3 s obsahem 0,35 % Mg bylo experimentálně zjištěno, že optimální přídavek cínu je 0,05 % – minimální odchylka od tohoto množství způsobuje zhoršení mechanických vlastností. [9] [11]



## 2.6 Mechanické, fyzikální a slévárenské vlastnosti vybraných slitin

### 2.6.1 AlSi10Mg (EN AC - 43 100)

Všeobecný popis vlastností: Mírně podeutektická slitina s dobrou obrobitelností, korozivzdorností a pevností za zvýšených teplot (do 200°C). Vyniká výbornými licími vlastnostmi, odolností vůči trhlinám za tepla a výbornou svažitelností.

Způsoby odlévání: Slitina je vhodná pro odlévání do písku a do kovových forem. Nízký sklon k vnitřním staženinám při tuhnutí.

Možnosti použití: Je umístěna na předních příčkách použití, kdy dosahuje až 80 % produkce. Pro složité, těsné a cyklicky namáhané odlitky, např. díly motorů, klikové skříně, brzdové součásti.

Tepelné zpracování: Použití odlitku ve stavu vytvrzeném. Vytvrzovací proces obsahuje 520–530°C/3-6 hod rozpouštěcí žíhání, zchlazení ve vodě a umělé stárnutí při 150–175°C/5 – 15 hod. [2] [8]

Chemické složení a hodnoty slévárenských, mechanických a fyzikálních vlastností slitiny AlSi10Mg jsou uvedeny v tabulce č. 1 a 2.

**Tabulka č. 1 Chemické složení slitiny AlSi10Mg (EN AC – 43 100) [2]**

chemické složení v [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Jiné <sup>2)</sup> celkem
		9,0 - 11,0	0,55	0,1	0,45	0,20 - 0,45
AlSi10Mg	Ti	Ni	Zn	Pb	Sn	Al
	0,15	0,05	0,1	0,05	0,05	zbytek

**Tabulka č. 2 Vlastnosti slitiny AlSi10Mg (EN AC – 43 100) [2]**

Slévárenské vlastnosti		Mechanické vlastnosti odděleně litých zkušebních tyčí		Mechanické a fyzikální vlastnosti	
Interval tuhnutí v [°C]	cca 550 - 600	Pevnost v tahu Rm [MPa]	180	Měrná hmotnost	2,65 kg/dm <sup>3</sup>
Nepropustnost	dobrá	Mez kluzu Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	90	Svažitelnost	vynikající
Zabíhavost	vynikající	Tažnost A [%]	2,5	Obrobitelnost	dobrá
Odolnost proti trhlinám za tepla	vynikající	Tvrdoost dle Brinella	55 HBS	Odolnost proti korozi	dobrá

<sup>2)</sup> Označení „jiné“ jsou ostatní prvky, nezahrnující očkovací a modifikační prvky jako jsou Na, Sr, Sb a P. [2]

### 2.6.2 AlSi7Mg0,3 (EN AC-42 100)

Všeobecný popis vlastností: Pódeutektická slitina, která se vyznačuje dobrými slévárenskými vlastnostmi, dobrou korozivzdorností, svařitelností a obrobiteľností. Vyniká vysokou odolností proti trhlinám za tepla.

Způsoby odlévání: Slitina je vhodná pro lití na vytavitelný model a pro odlévání do pískových a do kovových forem. Tato slitina má malý sklon ke vzniku staženin.

Možnosti použití: Pro letecký a raketový průmysl. Pro automobilový průmysl, např. držáky, motory, podvozky, rámy a ne příliš dynamicky namáhané součásti.

Tepeľné zpracování: Vytvrditelná slitina. Používá se rozpouštěcí žíhání 530 – 535°C/3-6hod s následným ochlazením ve vodě, dále vytvrzení za teplot 190-225°C/4-6hod. [2] [8]

Chemické složení a hodnoty slévárenských, mechanických a fyzikálních vlastností slitiny AlSi7Mg0,3 jsou uvedeny v tabulce č. 3 a 4.

**Tabulka č. 3** Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,3 (EN AC – 42 100) [2]

chemické složení v [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Jiné <sup>(2)</sup> celkem
		6,5 - 7,5	0,19	0,05	0,1	0,25 - 0,45
AlSi7Mg0,3	Ti	Ni	Zn	Pb	Sn	Al
	0,08 - 0,25	-	0,07	-	-	zbytek

**Tabulka č. 4** Vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3 (EN AC – 42 100) [2]

Slévárenské vlastnosti		Mechanické vlastnosti odděleně litých zkušebních tyčí		Mechanické a fyzikální vlastnosti	
Interval tuhnutí v [°C]	cca 570 - 640	Pevnost v tahu Rm [MPa]	170	Měrná hmotnost	2,68kg/dm <sup>3</sup>
Nepropustnost	dobrá	Mez kluzu Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	90	Svařitelnost	dobrá
Zabíhavost	dobrá	Tažnost A [%]	2,5	Obrobiteľnost	výborná
Odolnost proti trhlinám za tepla	výborná	Tvrdość dle Brinella	55 HBS	Odolnost proti korozi	dobrá

## 3 Příprava taveniny před odléváním

### 3.1 Kvalita housek od výrobce

Kvalitní taveninu charakterizuje přesné chemické složení s co nejnižším obsahem oxidických i neoxidických vměstků a nízkou hodnotou naplynění. Tyto vlastnosti taveniny lze ovlivnit ze vsázkových surovin, typem a konstrukcí tavicích a udržovacích pecí a v neposlední řadě způsobem lití. Dále také metalurgickým ošetřením taveniny (rafinací, očkovaním, modifikováním, odstátím a odplyněním). Vsázkové suroviny tvoří housky, předslitiny pro dolegování a vratný materiál o stejném chemickém složení (vtoky, nálitky a zmetky). Se vzrůstajícími požadavky na kvalitu odlitku se snižuje podíl vratného materiálu, proto pro kvalitativně nenáročný odlitek je možné natavit materiál ze 100 % vratu. Naopak u odlitků, na které jsou zákazníkem kladeny vysoké nároky na kvalitu, je často slévárna nucena použít materiál z čistých housek primárního tavení. [3]

Kvalitní odlitek ovlivňuje celá řada faktorů, od volby materiálu až po způsob odlití. Zajištění kvalitního materiálu závisí již na dodavateli. Otázkou posledních let je, zda dodavatelé materiálu opravdu ctí chemické složení, které předepisují, anebo spoléhají na své dobré jméno, které mají ve slévárnách již vybudované. Vybavení českých sléváren častokrát není na takové úrovni, jako si mohou dovolit dodavatelské společnosti materiálu, z toho plyne, že kontrola chemického složení samotnou slévárnou neodhalí možné nedostatky materiálu, které nejsou přesně definovány v přijímacích podmínkách.

Nyní vznikají odborné práce zabývající se hraničním obsahem některých dosud nezkoumaných chemických prvků, které již v malém množství mohou ovlivňovat, ať už příznivě či nepříznivě, výsledné vlastnosti dané slitiny.

### 3.2 Tavení slitin hliníku

Ve slévárnách je běžné, že se natavení slitin provede v tavicích pecích a následně je kov rozvezen do udržovacích pecí. Tavicí pece slouží pro natavení kovu přibližně na lící teplotu a pro úpravu chemického složení. V udržovacích pecích se tavenina udržuje na teplotě předepsané technologickým postupem a je možné taveninu očkovat a modifikovat, ale tyto pece nejsou primárně uvažovány jako pece tavicí ani neslouží pro zásadní metalurgické úpravy. [1]

Na základě přivádění tepelné energie se ve slévárnách slitin Al vyskytují tavicí pece těchto typů:

- Pece plamenné
- Pece elektrické (odporové a indukční)

Čistý hliník má střední výšku teploty tání, běžně se uvádí teplota 660°C. [1] S rostoucím podílem hlavního legujícího prvku klesá teplota likvidu, dle binárního rovnovážného diagramu Al-Si. Lící teplota se vždy odvíjí od daného chemického složení slitiny, konstrukce odlitku (složitosti tvaru a tloušťek stěn). Avšak energie potřebná pro dosažení teploty, kdy dochází k natavení hliníkové slitiny, není dána teplotou tání, ale plochou pod křivkou teplotní závislosti měrného tepelného obsahu v tuhém a kapalném skupenství a také hodnotami latentního tepla. [3]

**Tabulka č. 5** *Tepelně-fyzikální vlastnosti hliníku a křemíku* [1]

Prvek	Teplota tavení [°C]	Střední měrné teplo [kJ/kg.K]		Skupenské teplo [kJ/kg]	Měrná tepelná kapacita [J/kg.K]
		V tuhém stavu	V tekutém stavu		
Hliník	660	1,05	1,09	396	24,2
Křemík	1410	0,84	2,1	1411	19,79

Nejdůležitější pochody při tavení kovů a jejich slitin jsou pochody oxidace, dezoxidace, naplynění, odplynění a propal komponentů vsázky. Ve fázi přípravy slitin k odlévání lze ovlivnit chemické složení slitiny legováním vhodnými předslitinami. [3]

### 3.3 Rizika spojená s přípravou taveniny

#### 3.3.1 Znehodnocení taveniny železem

Nepříznivý vliv na taveninu má kontakt s ocelovým a litinovým nářadím nebo s kelímkami pecí a to z důvodu uvolňování Fe do taveniny. Železo se v hliníku a jeho slitinách dobře rozpouští a vytváří intermetalické fáze, které výrazně snižují plastické vlastnosti výsledného odlitku. Proto nářadí a kelímky, které přicházejí do styku s taveninou, musejí být ošetřeny ochranným postříkem nebo nátěrem. Další cestou je použití kelímků z vhodných keramických materiálů (jako jsou SiC), nebo keramický materiál s vysokým obsahem oxidu křemičitého, který je při tavení redukován hliníkem.

### 3.3.2 Propal prvku Mg

Úpravy chemického složení během tavení slitin hliníku se provádějí po roztavení vsázky a po chemické analýze. Úprava chemického složení obsahuje drobné korekce obsahu jednotlivých prvků, eventuelně kompenzaci propalu. Prvek, u kterého jsou značné ztráty zapříčiněné propalem, je zejména hořčík. Hořčík z taveniny vyhořívá přibližně v obsahu 0,05 % za tavbu, proto je nutné následně hořčík do taveniny přidávat. U jiných prvků se s propalem obvykle nepočítá.

*Výpočet množství přidání předslitiny do taveniny:*

$$\text{předslitina} = \frac{\Delta X}{X_{\text{předslitina}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

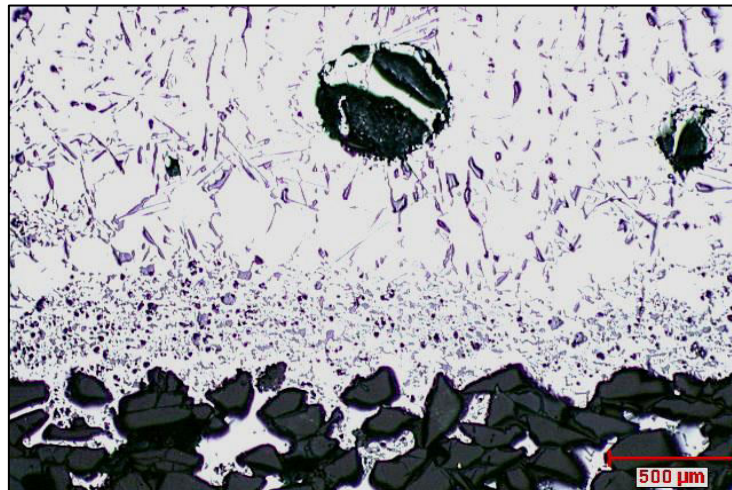
$\Delta X$  ... rozdíl mezi požadovaným a aktuálním obsahem prvku X ve slitině

$X_{\text{předslitina}}$  ... koncentrace přísadového prvku v předslitině

## 3.4 Rozpustnost plynů

### 3.4.1 Vznik plynových dutin v odlitcích

Hlavním důvodem vzniku dutin v odlitcích jsou objemové změny nastávající během tuhnutí a chladnutí odlitku. Vznik pórů a bublin má za následek zvýšený obsah porozity v odlitku.



**Obr. 2** Zobrazení bubliny ve struktuře pomocí mikrovýbrusu [1]

Vodík má nejmenší atomový poloměr (53 pm), vyskytuje se jak v molekulární, iontové, aniotové i katiotové formě, což umožňuje snadný pohyb v mřížce tuhých kovů. Při využití difúze je to jediný plyn, který může difundovat do kovu již za pokojové teploty. Základní chemická rovnice vzniku vodíku je ve tvaru:



Pro zamezení vzniku bublin je nutné snížit obsah vodíku pod hodnotu 0,1 až 0,2 cm<sup>3</sup>/100 g Al.

Ve slitinách hliníku se vodík rozpouští jak v tuhém tak i tekutém stavu, rozpouštění vodíku v hliníkových slitinách je spojeno s pohlcováním tepla (endogenní proces), proto s rostoucí se teplotou rozpustnost vodíku v hliníkových slitinách roste. Hlavním zdrojem vodíku je vlhkost obsažená již ve vstupním materiálu a to vlivem buď špatně skladovaných housek (ingotů), vratného materiálu (odpadu) a předslitin. Pokud dojde k úplnému vysušení vsázky, pak nedojde k naplynění taveniny. Pro odstranění povrchové vlhkosti je možné provést sušení v peci za teploty nad 100°C. Pokud je reálný obsah plynu ve slitině pod křivkou rovnovážné rozpustnosti za dané teploty, tak se plyn v kovu rozpouští bez negativního působení, ale pokud je koncentrace plynu vyšší, dochází při dané teplotě k vyloučení plynového přebytku v mikroskopických dutinách, a při výrazném naplynění může dojít k vytvoření bublin a pórů ve ztuhlém odlitku. [1] [12]

Z obr. 3 je zřejmé, že hodnoty rozpustnosti vodíku v hliníku jsou v desetinách cm<sup>3</sup> na 100 g kovu do teploty cca 660°C. Matematicky lze teplotní závislost rozpustnosti plynů ve slitinách vyjádřit vztahem:

$$C = A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (3)$$

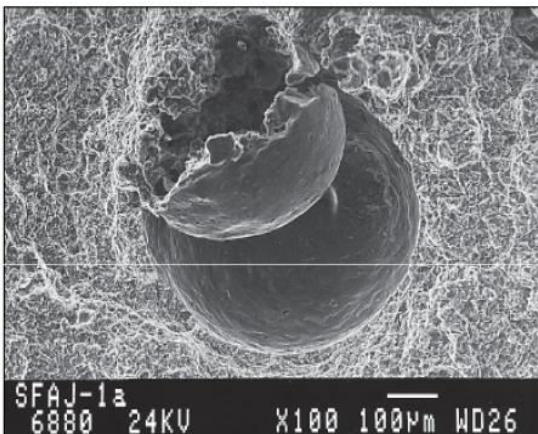
kde C ... rozpustnost plynu v kovu [cm<sup>3</sup> na 100 g kovu]

Q ... energie rozpouštění [J]

R ... plynová konstanta [J.K<sup>-1</sup>]

T ... teplota [K]

A ... konstanta



Nadměrné dutiny ve výsledném odlitku jsou v mnoha případech nepřijatelné. Je proto nutné snížit obsah plynů v tavenině. Způsoby snížení obsahu plynů v tavenině jsou založeny buď na principu rozdílného tlaku plynu v tavenině a v odplyňovacím zařízení anebo na snížené rozpustnosti plynu v tavenině s klesající teplotou. [3]

**Obr. 3** Vodíková bublina pokrytá vrstvou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3]

Dusík je významnou složkou vzduchu při tavení kovů v otevřené atmosféře. Nachází se ve formě atomárního dusíku nebo vzniká již při odlévání reakcemi na rozhraní kov-forma. Vykazuje minimální rozpustnost v hliníkových slitinách, což má za následek vytváření endogenních a exogenních bublin. Také při teplotách nad 700°C vznikají křehké a tvrdé nitridy (AlN), které jsou ve struktuře nežádoucí. Dusík nemusí mít pouze negativní vliv na taveninu. Dusík o vysoké čistotě se používá jako inertní plyn pro odplyňování, ve fázi před odléváním do forem.

### 3.5 Vměstky ve slitinách hliníku

Vměstky ve slitinách hliníku jsou velmi důležitým ukazatelem kvality. Vměstky jsou nežádoucí cizorodé částice nerozpustitelné v tavenině hliníku, které obvykle snižují užité vlastnosti odlitku. Jejich velikost se pohybuje od několika  $\mu\text{m}$  až po několik mm.

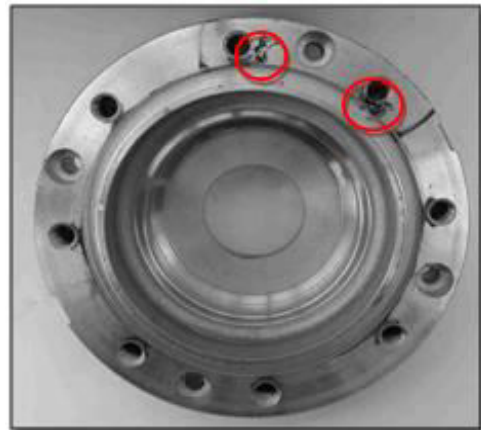
*Kovové vměstky* jsou nedokonale rozpuštěné legující prvky, nežádoucí příměsi nebo intermetalické fáze v tavenině. Jejich výskyt není příliš častý, a proto je obvykle málo významný.

*Nekovové vměstky* jsou tvořeny nekovovými částicemi, které byly kovem strženy nebo se v roztavené slitině chemickými reakcemi vytvořily. Dle původu se dělí na exogenní a endogenní.

*Exogenní vměstky* se do formy dostávají pomocí proudu kovu. Jejich původ je ze vsázkových surovin, legur, formovacích směsí, nátěrů, tavicích kelímků nebo vyzdívky tavicích pecí a licích pánví. Například nitridy (AlN,  $\text{Mg}_3\text{N}_2$ , TiN), karbidy ( $\text{Al}_4\text{C}_3$ , TiC, ZrC), boridy ( $\text{AlB}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ).

*Endogenní vměstky* se v tavenině objevují v důsledku vzájemných chemických reakcí kovových i nekovových prvků. Po chemické stránce je hliník velmi reaktivním kovem s vysokou afinitou ke kyslíku a uhlíku. Produkty těchto reakcí jsou hlavními typy těchto vměstků.

*Oxidické vměstky* se vyskytují jako velmi malé (o velikosti 0,03 až  $0,5\mu\text{m}$ ) disperzní částice nebo ve formě oxidických blan (šlemů). Vlivem turbulence taveniny dochází k porušení

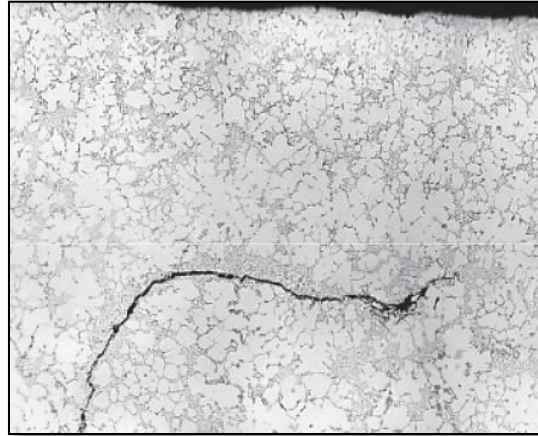


**Obr. 4** Nekovové vměstky uvnitř odlitku ze slitiny Al-Si odhalené po obrobení

ochranné oxidické vrstvy na povrchu, která má ochranou funkci před další oxidací. Narušením této vrstvy se oxidické částice dostanou do taveniny, kde se shlukují a vytvářejí tzv. clustery, které při přehřátí nad cca 780°C se transformují na korund ( $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Proto by teplota v udržovací peci neměla přesáhnout 780°C. Vznik korundu je hlavní příčinou zhoršení obrobiteľnosti.



**Obr. 5** Oxidická blána v přechodové oblasti



**Obr. 6** Oxidická blána ve struktuře [15]

Reoxidace je doprovodný jev, který vzniká během odlévání hliníkové slitiny a následně uvnitř slévárenské formy. Tento jev vzniká i přes veškerá předchozí opatření (k zachycení kovových, nekovových i oxidických vměstků) a je jen obtížně odstranitelný.

### 3.6 Rafinace taveniny

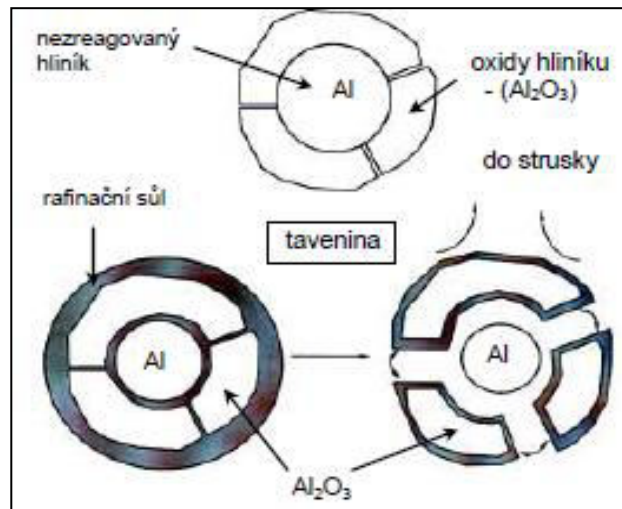
Jako rafinace taveniny je označen proces, při kterém se v tavenině snižuje množství vměstků. Při rafinaci se uplatňují následující postupy:

- Chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí
- Odplynění taveniny
- Filtrace taveniny

#### 3.6.1 Chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí

Metoda pro zabránění vzniku vměstků anebo jejich odstranění z taveniny probíhá za použití rafinačních solí ve formě prášků, briket, tablet i granulátu, které se při teplotě cca 600°C rozkládají a tím dávají prostor ke vzniku plynného dusíku, či chlóru a fluóru. Pomocí ponorného zvonu se soli ponoří na dno kelímku, kde dochází k jejich pozvolnému rozpouštění. Po ukončení chemické reakce vyplavou nečistoty na povrch a z hladiny roztaveného kovu se pomocí stěrky stáhne struska.





Obr. 7 Rozrušení oxidické obálky a uvolnění hliníku

### 3.6.2 Odplynění taveniny

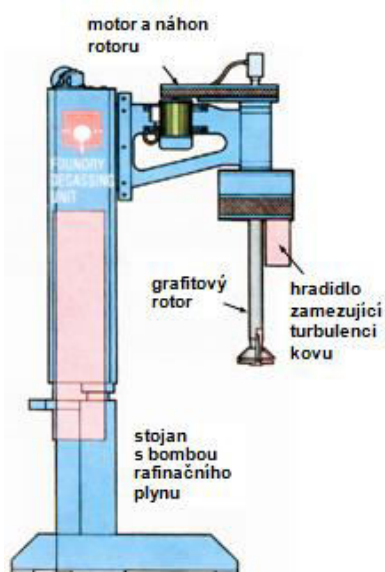
Vady vzniklé uzavřením plynů v odlitcích – bubliny, póry, jsou příčinou jedné z nejrozšířenějších vad ve slévárnách hliníku, pórovitosti. Pórovita zhoršuje celou řadu výsledných vlastností hliníkových odlitků (pevnost, tažnost, únavové vlastnosti, kvalitu obrobených ploch, povrchovou úpravu). Vady způsobené plynovými dutinami jsou obvykle neodstranitelné, ale lze jim předcházet odplyněním taveniny. [3]

*Způsoby odplyňování taveniny:*

- Profukování taveniny inertními nebo aktivními plyny
- Odstátí taveniny
- Vakuování
- Ošetření taveniny speciálními přípravky
- Použití fyzikálních metod (vibrace, ultrazvuk, stejnosměrný proud, zmrazení a rychlé ohřátí, odlévání a tunutí v autoklávu)

#### Profukování taveniny inertními nebo aktivními plyny

Tato metoda je založena na fyzikálně chemickém principu. K odplynění se používají plyny o vysoké čistotě (99,99 %) z důvodu obsažení minimální vlhkosti. [12] Argon je nejčastěji používaný inertní plyn, ale lze použít i dusík, v případě že nehrozí vznik nitridů. Jako aktivní plyn se používal chlor (v kapalně i plynné formě), nyní z ekologických důvodů je jeho používání omezeno. Odplyňování probíhá na odplyňovacím zařízení, za jehož pomoci dochází k odplynění taveniny a zároveň ke snížení obsahu nekovových vměstků.



*Princip procesu:*

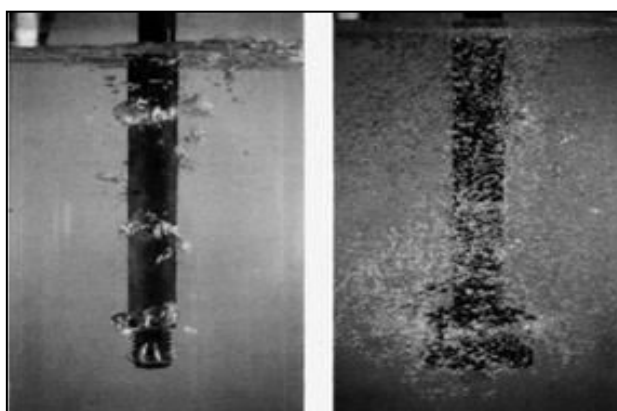
Tavenina v kelímku je přivezena k odplyňovacímu zařízení. Do kelímku se ponoří rotor, kterým se z tlakové lahve přivádí inertní plyn a vlivem otáčení rotoru dochází k dokonalému rozptýlení bublin. Molekuly nežádoucího plynu difundují z taveniny do vnášených bublin inertního plynu a vzhledem k rozdílné hustotě jsou nekovové vměstky vynášeny na povrch spolu s plynovými bublinami. Bubliny spolu s vodíkem vyplouvají na hladinu rychlostí  $v$ , která je dána Stokesovým zákonem [1]:

**Obr. 8** Odplyňovací zařízení

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot (\rho_{kovu} - \rho_{plynu})}{\eta \cdot r^2}, \quad (4)$$

- kde  $\rho$  ... hustota kovu a plynu [kg.m<sup>-3</sup>]  
 $\eta$  ... dynamická viskozita [kg.s<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>]  
 $r$  ... poloměr bubliny [m]  
 $v$  ... rychlost vyplouvání bublin [m.s<sup>-1</sup>]

Pro dokonalé odplynění taveniny je žádoucí, aby bubliny vnášeného plynu byly co nejmenší, např. 1 dm<sup>3</sup> plynu vytvoří bublinu o průměru  $\varnothing$  10 mm, jejich celkový povrch je 6 m<sup>2</sup>, pokud ale bude mít bublina průměr  $\varnothing$  1 mm povrch se zvýší na 60 m<sup>2</sup>. S tím je spojena i rychlost vyplouvání. Tedy 10 krát menší bubliny vyplouvají 100 krát menší rychlostí. Z toho plyne, že malá velikost bublin, dostatečně dlouhá dráha a dobré promíchávání (homogenizace) taveniny, jsou klíčové faktory účinného odplynění. [1]



**Obr. 9** Porovnání velikosti vnášených bublin na odplyňovací proces (vlevo pomocí odplyňovací trubice, vpravo pomocí odplyňovacího rotoru)

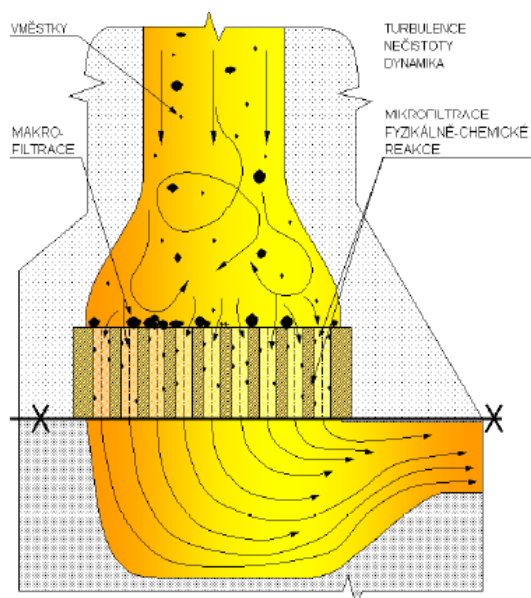
V závěru odplyňovacího procesu se ze zásobníku do taveniny ještě přidají rafinační soli, které čistí taveninu a napomáhají oxidům k vyplouvání na hladinu, kde dochází k vytvoření souvislé vrstvy, která je následně stěrem z povrchu odstraněna. V tavenině zůstane solemi od oxidů uvolněný kovový hliník.

### Odstátí taveniny

Odstátí taveniny je založeno na principu separace vměstků a jejich samovolné vyplouvání na povrch taveniny. Vzhledem k srovnatelným hustotám vměstků a taveniny je tento proces poněkud časově náročný (několik desítek minut až hodin) a ne příliš efektivní ke snížení vměstků v tavenině. Často se ale využívá jako předchůdný proces před další rafinací.

### 3.6.3 Filtrace taveniny

Filtrace taveniny probíhá ideálně během samotného procesu odlévání a to za pomoci keramických (na bázi  $Al_2O_3$ , SiC,  $ZrO_2$  či grafitu), šamotových a ocelových filtrů. Filtraci je též možno zařadit do přelévání slitiny z tavicí pece do transportní pánve. Použitím filtrů se mění proudění tekutého kovu z turbulentního proudění na proudění laminární (které vzniká za filtrem), viz obr. 10 a tím se zklidňuje průběh plnění formy. [3] [14]



**Obr. 10** Usměrnění toku taveniny – z turbulentního proudění na laminární proudění [14]

Filtrací lze snížit obsah nečistot (1,5 až 2 násobně) a zároveň zabránit vzniku nových. Díky tomu lze omezit vznik nežádoucích vad v odlitku. Při gravitačním odlévání se filtry vkládají do lící jamky nebo přímo do vtokové soustavy nejbližší tvaru odlitku. Při odlévání na nízkotlakém stroji se filtry (zpravidla ocelová síťka) umístí do vtoku, kde zachycují nežádoucí kovové i nekovové vměstky. Umístěním keramického filtru i do stoupač trubice nízkotlakého stroje zajistíme dvojnásobnou filtraci taveniny.



**Obr. 11** Obrázek rentgenu odlitku s Fe sítkem umístěným ve vtoku [18]

Dalším účinkem filtrace taveniny je rozmělnění částic vzniklých porušením souvislé oxidické vrstvy vznikající na povrchu taveniny. [15]

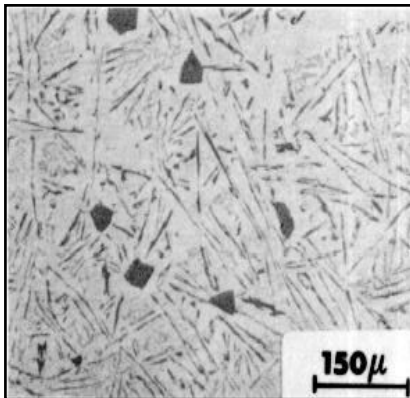


**Obr. 12** Ukázka pěnových filtrů pro slitiny neželezných kovů [14]

## 4 Ovlivnění morfologie struktury

### 4.1 Krystalizace eutektika

Křemík se v binárních slitinách Al-Si vylučuje jako čistý prvek a v eutektiku se může vyloučit v různých formách. Krystalizace eutektického křemíku proto ovlivňuje druh eutektika, které může být zrnité, lamelární, či modifikované. [4] [5]



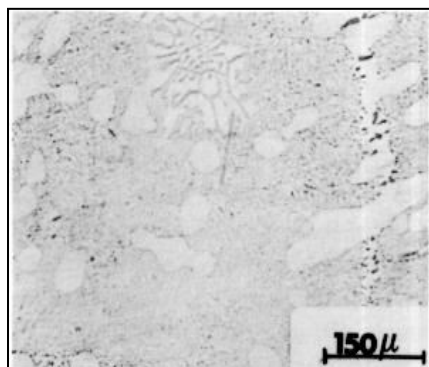
**Obr. 13** Zrnité eutektikum [28]

Zrnité eutektikum je obvyklá forma nemodifikovaného eutektika, která vzniká ve slitinách běžné technické čistoty. Neorientované rozložení eutektického křemíku (tmavé plochy) ovlivňuje obsah fosforu v zastoupení 5 - 10 ppm. Krystalizace zrnitého eutektika je málo energeticky náročná, dochází k ní již při malém přechlazení o 1 – 2 °C pod rovnovážnou eutektickou teplotu 577°C.



**Obr. 14** Lamelární eutektikum [28]

Druhý typ je lamelární eutektikum, kde krystalizace a růst částic probíhá obdobně jako u zrnitého eutektika. Fosfor je ve slitině zastoupen pouze v malém množství (1 - 2 ppm), proto zde nejsou vytvořeny příznivé podmínky pro nukleaci. Z tohoto důvodu krystalizace lamelárního eutektika nastává při výrazně větším přechlazení (2 - 5 °C pod rovnovážnou eutektickou teplotou). Křemík se shlukuje do jemných lamel, které jsou paralelně uspořádány a vytvářejí tak vějířové rozložení eutektického křemíku.



**Obr. 15** Modifikované eutektikum [28] za vysoké rychlosti ochlazování (400 – 1000 μm/s). [1]

Modifikované eutektikum vzniká za přítomnosti modifikačních prvků, kterými jsou převážně sodík a stroncium. Sodík má nejvyšší modifikační účinek, prvky se slabším modifikačním účinkem (např. Ba, Yb, Sb, Ca) se prakticky nepoužívají. V modifikovaném eutektiku mají částice křemíku tvar jemných vláken. Jemné, dobře modifikované struktury lze dosáhnout

Vnášení očkovacích a modifikačních činidel do taveniny lze provést několika způsoby. Záleží na technologii odlévání a na preferenci slévárny. Obecně pro technologii odlévání na nízkotlakém stroji, kdy je kelímek s taveninou zpřístupněn pouze kontrolním otvorem v plášti pece, je vhodné ošetřovat taveninu použitím předslitin ve formě tyčí či drátů. Při gravitačním odlévání, kdy je tavenina snadněji přístupná, lze očkování i modifikaci provádět za použití očkovacích solí ve formě tablet či kapslí. Tyto tablety se umístí (ponoří) do kelímku s taveninou a ponorným zvonem se drží pod hladinou až do doby, kdy dojde k dokonalému rozpuštění. Po ošetření taveniny u gravitačního odlévání se na hladině vytvoří struska, tvořená zbytkem solí a nečistotami, kterou je nutné z povrchu taveniny odstranit. Je výhodné, aby proces očkování probíhal spolu s modifikací.

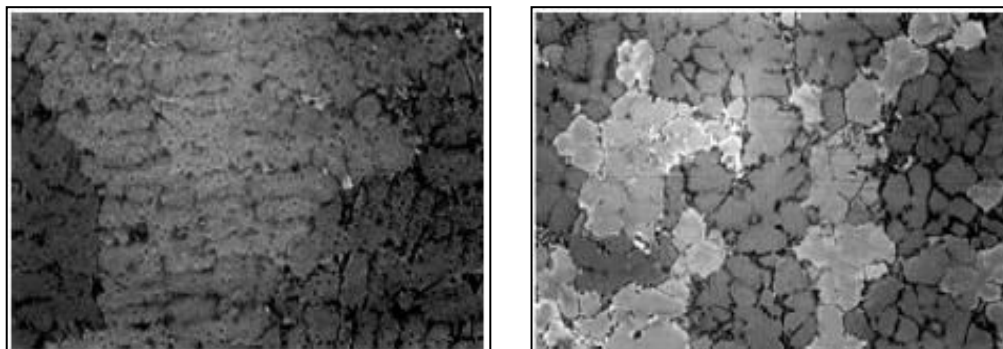


Obr. 16 Očkovací tyče a modifikační tableta

#### 4.1.1 Očkování před krystalizací eutektika

Očkování je postup ošetření taveniny, při kterém se do taveniny uměle vnášejí činidla pro zvětšení množství krystalizačních zárodků. Vysokého očkovacího účinku se dosahuje zejména u podeutektických slitin s vysokým obsahem  $\alpha$  fáze. Se vzrůstajícím počtem zárodků se zvyšuje homogenita a disperzita taveniny a tím dochází k nárůstu mechanických vlastností.

Očkovací předslitiny jsou tvořeny prvky Ti a B, které se do taveniny přidávají v podobě předslitin, kombinovaně nebo samostatně. Při použití samostatného prvku Ti, je jeho očkovací účinek málo výrazný, vzhledem ke skutečnosti, že se v tavenině mohou nacházet ne zcela rozpuštěné intermetalické fáze  $TiAl_3$ , tzn. méně krystalizačních zárodků. V této souvislosti se projevuje významný vliv teploty očkování a doby výdrže na této teplotě. Čím vyšší teplota očkování a delší doba výdrže, tím více rozpuštěných částic intermetalické fáze  $TiAl_3$  a nižší očkovací efekt. [3]



**Obr. 17** Vliv očkování na velikost zrna primární fáze, vlevo – neočkovaná struktura, vpravo – očkováná struktura s 0,2 % Ti [1]

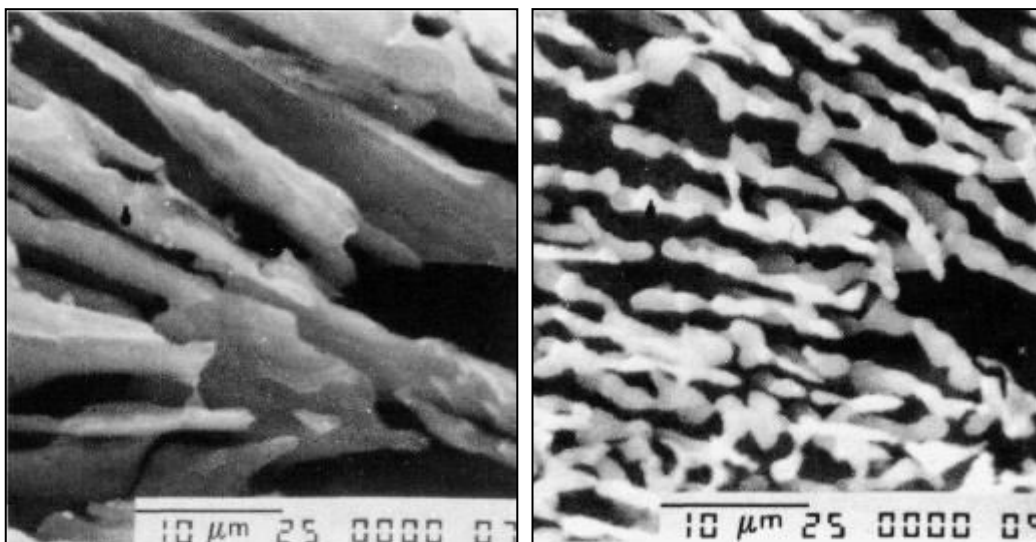
Chemický prvek bór, použitý samostatně, je neúčinnější očkovací prvek. Jako krystalizační zárodky působí částice fáze  $AlB_2$ , které nejsou úplně rozpuštěny po vnesení předslitiny (např.  $AlB_4$ ) do taveniny. Výše teploty očkování a doba výdrže (obvykle 10 min.) nemá výrazný vliv na očkovací účinek, protože částice  $AlB_2$ , vznikají již při primární krystalizaci.

Kombinace Ti a B pro očkování slitin hliníku podává uspokojující výsledky ke zjemnění tuhého roztoku  $\alpha$ . Do taveniny se tyto prvky vnášejí ve formě předslitin typu  $AlTiB$  s rozdílným obsahem Ti a B, obsah Ti je 5 % a obsah B je 1 %. Pozměněním tohoto poměru očkovací účinek na taveninu klesá. Zjemnění kombinací těchto prvků probíhá tak, že jako krystalizační zárodky působí částice  $TiB_2$  s obalem tvořeným fází  $TiAl_3$ . Tyto zárodky byly do taveniny vneseny předslitinou  $AlTiB$  ale úplně se nerozpustily.

Téměř všechny předslitiny typu  $AlTiB$  mají rychlý očkovací nástup (v řádu minut). Intenzita očkování nezávisí na době výdrže ani na teplotě očkování, nedoporučuje se však setrvávat na vyšší teplotě než 750 °C déle jak 10 min, docházelo by ke zhrubnutí struktury. Při úpravách slitin typu  $AlSi11$  a  $AlSi9Cu3$  dochází při překročení doby výdrže 30 minut ke zhoršení očkovacího účinku. [3]

#### 4.1.2 Modifikace

Cílem modifikace taveniny u eutektických a podeutektických slitin je změnit morfologii vyloučeného eutektického křemíku - z destičkovitého tvaru křemíku na tvar tyčinky, viz obr. 18. Obdobně jako u očkování, tak i modifikace taveniny lze učinit několika způsoby – ve formě předslitin, tak ve formě tablet či patron. Chemické prvky Na, Sr a Sb jsou hlavními prvky ovlivňujícími morfologii křemíku.



**Obr. 18** Změna tvaru křemíku vlivem modifikace [3]

#### Modifikace sodíkem

Modifikace sodíkem je provázena bouřlivou reakcí, která zrychluje, ale zároveň snižuje modifikační účinek. Délka působení modifikačního účinku je rozdílná. Pokud se pro modifikaci použije čistý sodík ve formě patron doba účinnosti je min. 30 minut i více. Při použití sodíku ve formě solí se doba účinnosti zkracuje na 10 – 15 minut, u tablet je tomu o několik desítek minut déle.

S použitím sodíku jako modifikátoru jsou spojeny i negativní vlivy na taveninu, jako např. zvýšení stupně naplynění taveniny, ale zároveň není možné po modifikaci taveninu odplyňovat ani filtrovat, z důvodu úbytku modifikačního efektu. Po modifikaci je také vyšší riziko vzniku objemových staženin.

Sodík a ostatní povrchově aktivní prvky (např. Sr), způsobují zpoždění krystalizace eutektického křemíku, v důsledku čehož klesá teplota eutektické přeměny na 569°C a eutektická koncentrace se posouvá od 1,3 % Si k 14 % Si. [3] [27]

#### Modifikace stronciem

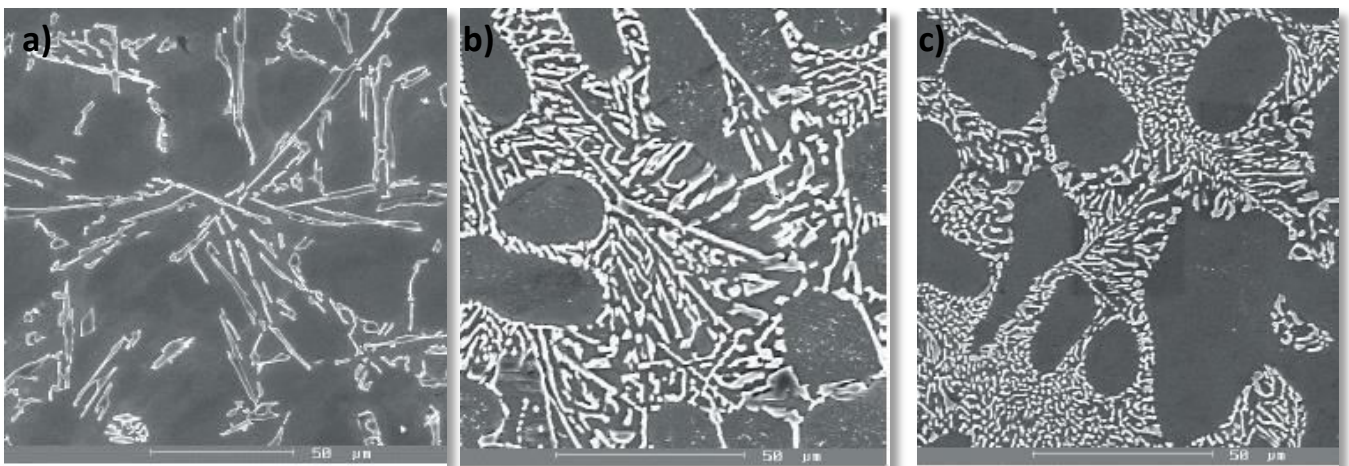
Stroncium jako modifikátor ve velké míře nahrazuje sodík a to z důvodu eliminace negativních vlastností, jakými sodík disponuje (popsáno výše). Při modifikaci za použití stroncia lze dosáhnout prodloužení modifikačního účinku až na 2 hodiny i déle, avšak s pozdějším nástupem modifikačního účinku. Stroncium se do taveniny přidává ve formě předslitiny, typu AlSr5, AlSr3,5, AlSr10. [7]



**Tabulka č. 6** Doporučené dávkování Sr dle obsahu Si ve slitině [7]

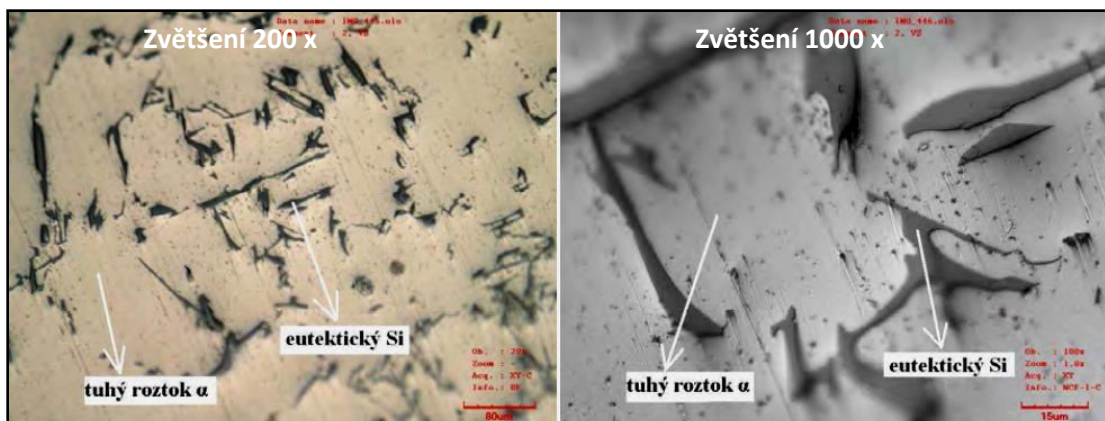
Obsah křemíku [%]	Přídavek stroncia [%]
4 - 7	0,01 - 0,02
8 - 10	0,03 - 0,04
11 - 13	0,04 - 0,06

Doporučené dávkování Sr do taveniny se odvíjí od tloušťky stěny odlitku a od obsahu křemíku (tabulka č. 6). Při překročení optimálního množství vznikají křehké fáze ( $Al_2Si_2Sr$ ), které se vylučují v segregačních oblastech.

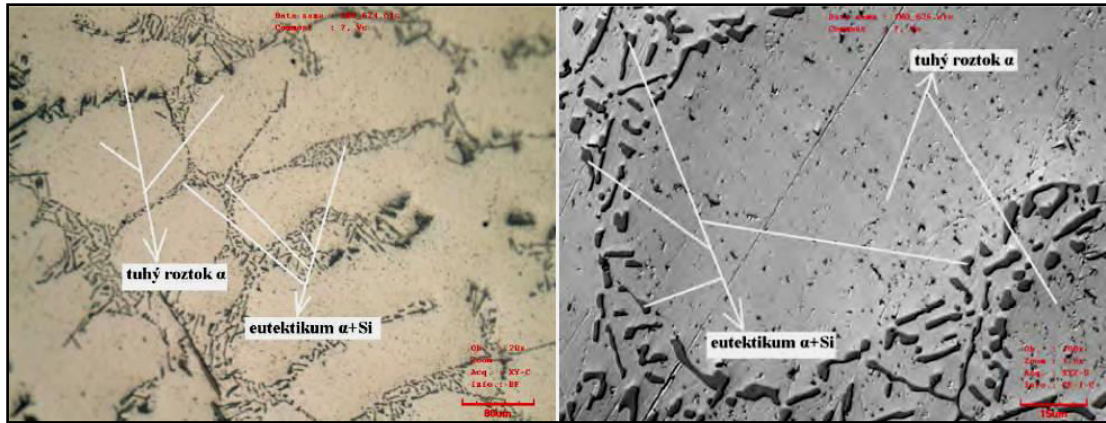


**Obr. 19** Morfologie eutektického křemíku s množstvím, a) 0 % Sr; b) 0,01 % Sr; c) 0,05 % Sr

Modifikační účinek stroncia lze prodloužit příměsí beryllia o obsahu (0,05 až 0,2 % hm.) až po dobu 10 hodin. Beryllium snižuje rychlost oxidace taveniny, čímž stabilizuje účinek stroncia.



**Obr. 20** Podeutektická nemodifikovaná struktura hliníkové slitiny typu  $AlSi7Mg0,3$  [17]



**Obr. 21** Modifikovaná podeutektická struktura 0,04 % Sr hliníkové slitiny typu *AlSi7Mg0,3* [17]

Antimon je další účinný prvek pro ovlivnění morfologie eutektika. Používá se již při prvovýrobě v hutích a jeho účinek je trvalý. Nevýhodnou vlastností antimonu je skutečnost, že potlačuje příznivý účinek modifikátorů stroncia a sodíku. Chemické prvky Te, Ca, S a P jsou dalšími prvky používané pro modifikaci. [3]

Účinnost očkování a modifikace lze kontrolovat provedením termické analýzy, což bude podrobněji popsáno dále v textu.

## 5 Nástroje k hodnocení kvality taveniny

Kontrola taveniny musí probíhat během celého výrobního cyklu, tzn. v průběhu tavicí etapy, na zkušebních vzorcích i na hotových odlitcích.

### 5.1 Měření naplynění

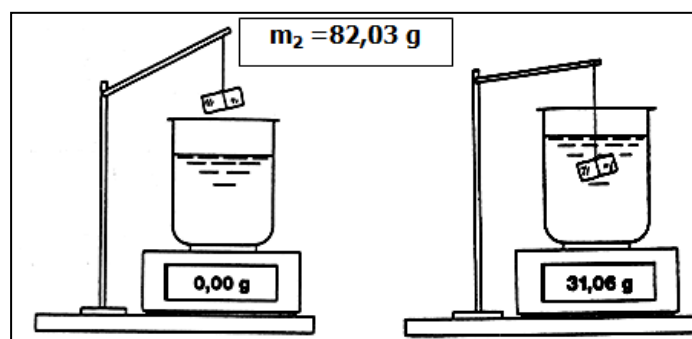
Provozní zjištění stupně naplynění taveniny je založeno na principu pozorování povrchu vzorku po ztuhnutí. Jestliže je tavenina dostatečně odplyněná, projeví se to propadnutím povrchu vzorku následkem objemové změny při ztuhnutí. Případným porovnáním řezů vzorků s etalony se zjistí přibližná hodnota naplynění taveniny. Vzhledem k důležitosti vyhodnocování tohoto parametru v provozu je tato metoda závislá pouze na porovnávacím principu s etalonem, což se zdá být poměrně nedostačující. [3]



**Obr. 22** Porovnání vzorků, naplyněných (vlevo a uprostřed), odplyněných (vpravo) [18]

Metoda dvojího vážení je mnohem přesnější metoda pro zjištění stupně naplynění taveniny. Princip metody je založen na dvojím vážení dvou vzorků a porovnání jejich hustot. Dva vzorky se připraví naplněním speciálního kelímku, jehož povrch musí být před zkouškou ošetřen ochranným nátěrem. První vzorek tvoří tavenina o hmotnosti 50 g, která tuhne v kelímku za atmosférického tlaku. Druhý vzorek se umístí do vakuové komory a tuhnutí probíhá při podtlaku, jenž dosahuje hodnot 80 mbar ( $\pm 1$  mbar).

Doba umístění vzorku ve vakuové komoře závisí na chemickém složení, tzn. na typu slitiny. Pro podeutektické slitiny Al-Si (obsah křemíku v rozmezí 5 – 10 %) je doba umístění vzorku pod tlakem 4 minuty, pro slitiny eutektického složení (obsah křemíku v rozmezí 10 – 13 %) se doba umístění vzorku pod tlakem prodlouží na 6 – 7 minut.



**Obr. 23** Měření Dichte Indexu - metoda dvojího vážení vzorků

Následně se vzorky zváží na vzduchu a ve vodě a dojde k vzájemnému porovnání hmotností, z čehož lze určit i hustoty vzorků dle následujícího výpočtu [1]:

$$\text{Výpočet objemu vzorku} \quad V_{vz} = \frac{m_{vz H_2O}}{\rho_{H_2O}}, \quad (5)$$

$$\text{Výpočet hustoty vzorku} \quad \rho_{vz} = \frac{m_{vz atm}}{V_{vz}}, \quad (6)$$

Objem vyloučeného plynu je roven rozdílu měřených objemů vzorku [1]:

$$V_{H_2} = \left( \frac{1}{\rho} vz vak \right) - \left( \frac{1}{\rho} vz atm \right), \quad (7)$$

kde	$m_{vz atm}$ ... hmotnost vzorku na vzduchu	[g]
	$m_{vz H_2O}$ ... hmotnost vzorku ponořeného ve vodě	[g]
	$\rho_{H_2O}$ ... hustota vody	[g / cm <sup>3</sup> ]
	$\rho_{vz}$ ... hustota kovu vzorku	[g / cm <sup>3</sup> ]
	$V_{H_2}$ ... objem vyloučeného plynu	$\left[ \frac{m^3 H_2}{kg} Al \right]$

Z hustot  $\rho_{vz\ atm}$  a  $\rho_{vz\ vak}$  a jejich dosazením do vzorce se následně vypočítá DI (Dichte Index) – index hustoty.

$$DI = \frac{\rho_{atm} - \rho_{vak}}{\rho_{atm}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8)$$

Výsledkem je číselná hodnota udávající procentuelní vyjádření obsahu plynů ve vzorku. Čím menší hodnota DI, tím menší procento naplynění a tím lepší je metalurgická kvalita taveniny. Avšak vzorek s 0 % naplyněním je pouze teoretická hodnota, prakticky přijatelné hodnoty naplynění jsou v rozmezí 3 - 7 %, ale vždy záleží na požadované kvalitě odlitku. [1]

## 5.2 Drosstest

Drosstest je metoda pro zjištění naplynění a obsahu vměstků. Měření probíhá ve vakuové komoře (při tlaku <1 mbar), kam se do speciálního kelímku odlije zkušební vzorek o hmotnosti 200 g.

Uvnitř zařízení za sníženého tlaku dochází k varu taveniny a ochlazováním ode dna kelímku se veškeré nečistoty, oxidy a vměstky postupně vytlačí k hladině kovu. Doba ponechání vzorku v prostředí se sníženým tlakem je v rozmezí 8 – 10 minut. Po vyjmutí vzorku z přístroje následuje jeho vyhodnocení. Vizuálně se hodnotí povrch vzorku, kde se během tuhnutí za sníženého tlaku nahromadily nečistoty a vměstky z taveniny. Není nutné vzorek rozřezávat. [1] [19]

Výsledek zkoušky lze těžko kvantifikovat, tudíž i interpretace výsledků je značně obtížná. Ale na druhou stranu, lze ve slévárně snadno vytvořit interní etalony, podle kterých jsou vzorky posuzovány a následně přiřazovány do kvalitativních skupin. [18] [20]

## 5.3 Straube – Pfeiffer Test

Princip měření touto metodou je podobný metodě Drosstest. Lze použít stejné vakuové zařízení, stejný kelímek pro nalití vzorku a i doba tuhnutí vzorku je stejná (8 - 10 min). Rozdíly nastávají v tlaku, při kterém dochází k tuhnutí vzorku a v interpretaci výsledků.

Při Straube – Pfeiffer Testu vzorek tuhne za vyšších tlaků (do 30 mbar) než u metody DrossTest. Tudíž nedochází k dokonalému vyčištění – vynesení všech nečistot na povrch, ale plyny a oxidy zůstanou uzavřené uvnitř. Proto je k analýze a následnému vyvození závěrů potřebné rozříznutí vzorků. Příčný řez vzorkem odhalí počet a velikost uzavřených plynových pórů uvnitř. Následně lze již vzorek vyhodnotit.

Z toho vyplývá, že metoda Straube – Pfeiffer je vzhledem k následné potřebné operaci – rozříznutí vzorku, náročnější. Avšak obě tyto zkoušky jsou kvalitativní, nelze je nijak kvantifikovat. [18]

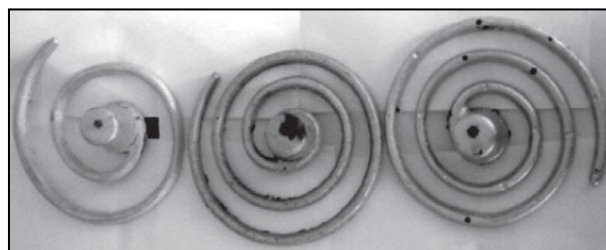


Obr. 24 Vzorky získané ze zkoušky DI, Straube – Pfeiffer Test a Dross Test [18]

#### 5.4 Zkouška zabíhavosti

Zkoušky zabíhavosti patří mezi nejstarší technologické zkoušky ve slévárenství. Podle tvaru odlévaných vzorků se dělí na tři hlavní skupiny:

- vzorky s proměnlivým průřezem, např. klín, kruhová výseč apod.
- tyče a vertikálně uspořádané destičky
- tyče a horizontálně uspořádané destičky, spirály (např. Curyho spirála s konstantním průřezem, viz obr. 32)



Obr. 25 Vzorky odlité za pomoci Curyho spirály (vlevo vzorek z čistého hliníku Al 99,5; ve středu odlitek ze slitiny AlSi12CuNiMg; vpravo odlitek ze slitiny AlSi12) [16]

Obecně zabíhavost charakterizuje schopnost zaplnění dutiny formy – je to jedna z nejdůležitějších slévárenských vlastností kovů, která podmiňuje jejich slévatelnost.

Zabíhavost závisí na poměru rychlosti pohybu taveniny k rychlosti chladnutí. Zabíhavost, jako technologická vlastnost, se dále odvíjí od vlastností odlévané slitiny (např. teplota lití, chemické složení, interval tuhnutí) dále také na vlastnostech slévárenské formy (teplota předehřevu formy, vtoková soustava) z nichž nejdůležitější je ochlazovací účinek formy, tedy součinitel tepelné akumulace. [25] [26]

## 5.5 Spektrometrie

Spektrometrická analýza patří do skupiny nedestruktivních metod, kdy není zkoumaný odlitek nijak poškozen, a přesto poskytuje informaci o svém chemickém složení. Zkoušení probíhá na spektrometru, což je zařízení, které je schopné pomocí elektromagnetického záření určit koncentrace jednotlivých prvků ze vzorku odlitého ze zkoumané taveniny. Ve výrobních podnicích je toto zařízení nezbytné pro zjišťování chemického složení, což slouží jako podklad pro další zkoušky např. termickou analýzu.



**Obr. 26** Vzorek pro spektrální analýzu

Nejčastějším spektrometrem používaným v provozu je optický spektrometr, využívající emisní atomovou spektrometrii. Vzorky o tvaru hříbečku se připravují odlitím do kokily z taveniny, jejichž chemické složení je potřebné zjistit. Připravené vzorky se na spektrometrickém zařízení tzv. vyjiskří. Spojité spektrum se rozkládá pomocí hranolu umístěného uvnitř zařízení na samostatné frekvence a přes optickou soustavu čoček se zaměří do detektoru. Následně proběhne vyhodnocení dat s výstupem do počítače. Počítačem přijatá data speciální program vyhodnotí a koncentrace jednotlivých prvků přiřadí do příslušných koncentračních intervalů daných normou. [21] [22]

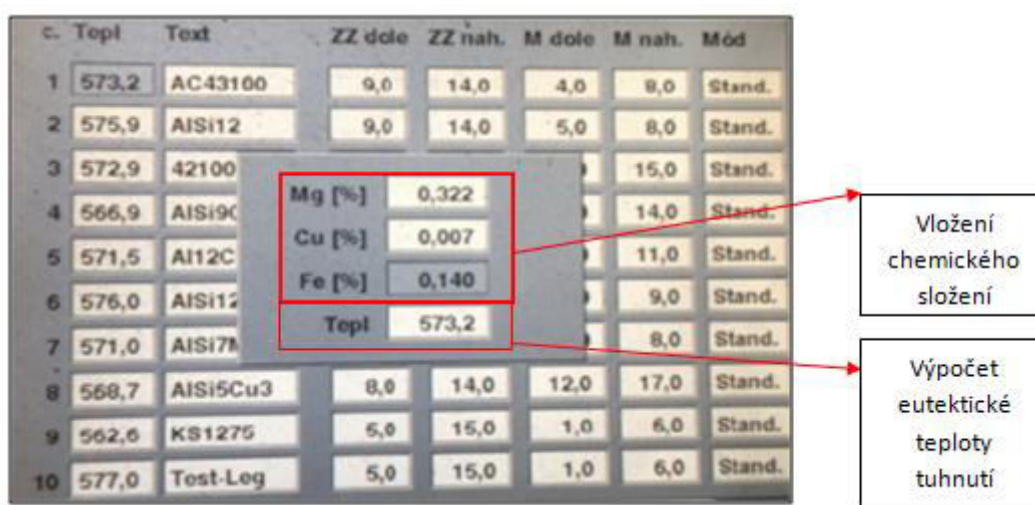


**Obr. 27** Jiskrový emisní optický spektrometr OES PolySpek [23]

## 5.6 Termická analýza

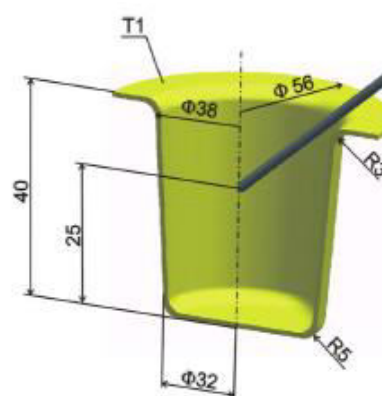
Termická analýza je velmi rozšířeným a užitečným prvkem pro kontrolu materiálu v provozu. Principem je vyhodnocení křivky chladnutí, která vzniká během tuhnutí vzorku. Tím je možné zjistit velikost zrna primární fáze a posoudit efektivitu očkovacího účinku. Dále vyhodnocuje eutektickou fázi, čímž se dá zjistit stupeň namodifikování eutektika.

Samotnému měření<sup>3)</sup> pomocí termické analýzy, předchází zjištění aktuálního procentuelního obsahu vybraných prvků (konkrétně Mg, Cu, Fe). Obsah těchto prvků se vloží do záznamového zařízení, viz obr. 28. a na základě těchto vložených dat proběhne výpočet eutektické teploty.



**Obr. 28** Obrazovka z přístroje termické analýzy – vkládání chemického složení

Po natavení a ošetření taveniny se z pece odebere vzorek, jenž se odlije do předem připraveného kelímku, umístěného v držáku přístroje termické analýzy. Kelímek musí být přehřátý a jeho povrch ošetřen ochranným postříkem nebo nátěrem. V zápětí se do kelímku s taveninou přivede termočlánek NiCr-Ni (opatřený ochrannou trubičkou viz obr. 29), který má za úkol měřit teplotu v závislosti na čase. Teplota taveniny uvnitř kelímku musí být nad teplotou likvidu, jinak hrozí nezhájení měření termické analýzy.



**Obr. 29** Detail termočláunku umístěného ve vzorku

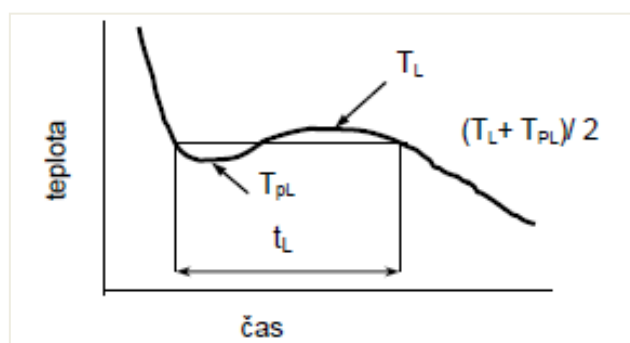
<sup>3)</sup> Oproti původním plánům bylo měření taveniny pomocí termické analýzy opuštěno, ale je zde ponechán její teoretický popis kvůli úplnosti přehledu nástrojů pro hodnocení kvality taveniny.

Během tuhnutí vzorku, lze na displeji pozorovat vykreslování křivky chladnutí. Pokud v okolí termočlánku dochází ke krystalizaci nebo fázové přeměně, tudíž teplotnímu ovlivnění okolí ve spojitosti s uvolňováním latentního tepla, je možné z křivky ochlazování určit teploty nukleace krystalizačních zárodků, růstu fáze a i dobu trvání těchto přeměn. Dále křivka tuhnutí poskytuje údaje o rekalescenci, tzv. přechlazení. [1] [3]



**Obr. 30** Zařízení TA 110 pro termickou analýzu a vzorek s ochrannou trubičkou NiCr-Ni

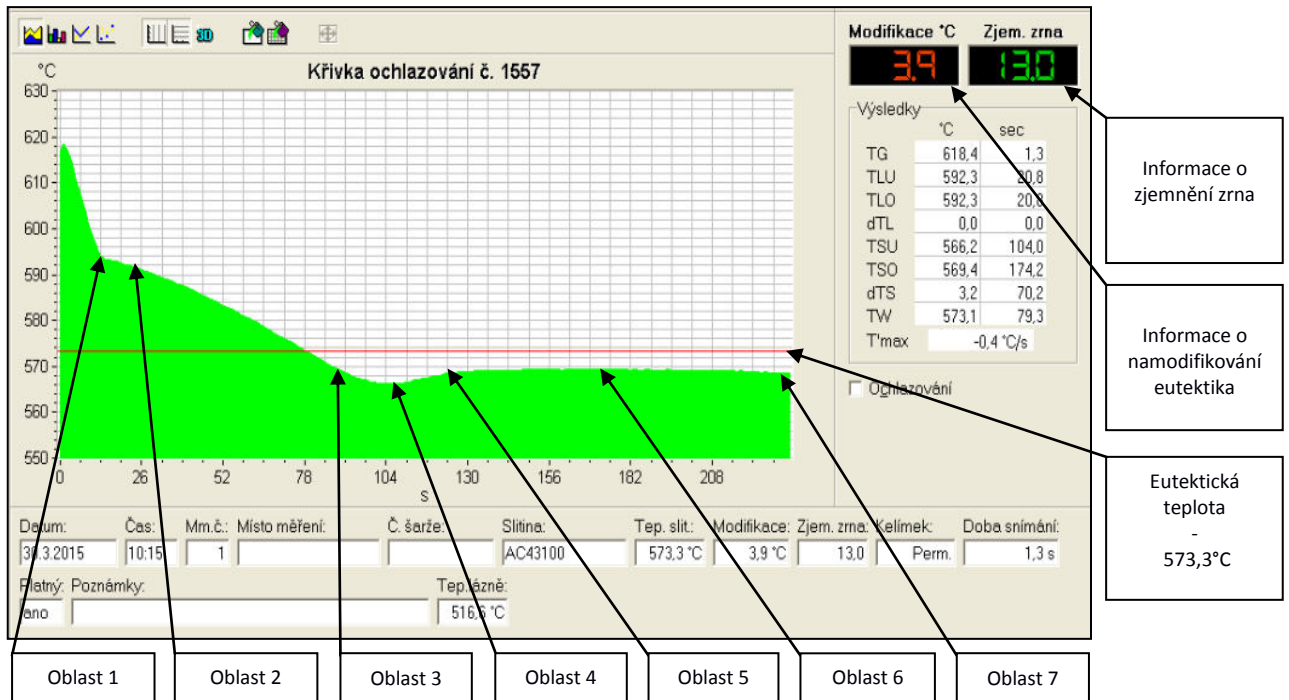
*Latentní teplo* (skupenské teplo tání) – je zřejmé z křivky ochlazování (i na její derivaci). Je to teplo potřebné ke krystalizaci. Projevuje se prodlevou a snížením rychlosti ochlazování. Uvolňuje se během krystalizace (a fázových přeměn) a je rovno teplotě přechlazení  $T_{pL}$  (obr. 31). U stabilní, vratné a jednosložkové soustavy probíhá uvolňování tepla za konstantní teploty. [3]



**Obr. 31** Křivka ochlazování s vyznačenou teplotou přechlazení – latentním teplem [1]

Po provedení první derivace křivky chladnutí zjistíme přesnější informace o průběhu tuhnutí, kdy derivace v každém bodě křivky představuje rychlost ochlazování zkoumaného vzorku. Ze stoupajícího charakteru křivky se dá vyvodit, že ve vzorku probíhá např. výskyt nové fáze, která uvolňuje latentní teplo, což je doprovázeno zpomalením rychlosti ochlazování. [1] [18]





**Obr. 32** Křivka chladnutí s popisem jednotlivých oblastí [18]

Popis jednotlivých oblastí křivky ochlazování:

- Oblast 1      Pokles na křivce – teplota rekalescence (přechlazení)
- Oblast 2      Teplota nukleace – vznik nových krystalizačních zárodků
- Oblast 3      Rychlost nukleace odeznívá a s výskytem mezifázového rozhraní ve středu vzorku se zastavuje čelní růst dendritů
- Oblast 4      Uvolňování latentního tepla a růst dendritů
- Oblast 5      Rychlý nárůst křivky odpovídající náhlé nukleaci krystalů křemíku
- Oblast 6      Pokračování v růstu hliníkové i křemíkové fáze v eutektiku při nižších teplotách ( $\Delta T_e = 3,9^\circ\text{C}$ )
- Oblast 7      Ztuhnutí vzorku s malým poklesem křivky, což je způsobeno umístěním termočlánku ve vzorku dle obr. 29. Ve středu kelímku na konci tuhnutí náhle končí uvolňování tepla, přičemž od stěn ke středu kelímku následuje rychlé vyrovnání teplotního gradientu. [18] [24]

## Experimentální část

### 6 Cíle experimentální části

Prvořadým cílem experimentální části je, jak již z názvu diplomové práce vyplývá, zjišťování změny kvality u dvou hliníkových slitin  $AlSi10Mg$  a  $AlSi7Mg0,3$  v závislosti na délce udržování taveniny v kelímkové peci. Kvalita bude posuzována na základě výsledků ze čtyř provedených zkoušek – spektrální analýza, Drosstest, Dichte Index a zkouška zabíhavosti.

Délka udržování materiálu v peci je empiricky stanovena na dobu 12 hodin, poté je materiál prohlášen za nevyhovující. Prováděnými experimenty je snaha stanovenou hodnotu 12 hodin buď potvrdit, anebo vyvrátit, ale pak následně navrhnout vhodnou dobu udržování materiálu v peci.

Druhým cílem experimentální části je vytvoření vlastních interních etalonů, potřebných k závěrečnému vyhodnocení zkoušky Drosstest. Vzhledem ke skutečnosti, že hodnocení vzorků vzniklých právě touto zkouškou je čistě subjektivní, jsou tyto etalony nezbytnou součástí výsledku.

Jako poslední cíl si experimentální část klade z naměřených hodnot a vyšlých závěrů nabytých během tvorby této práce učinit doporučení pro praxi a rovněž vytvořit podklady pro interní výuku či studium ve společnosti Beneš a Lát, a.s.

## 6.1 Průběh experimentální části

Jak již bylo řečeno, experimentální část probíhala pomocí čtyř zkoušek (spektrální analýza, Drosstest, Dichte Index a zkouška zabíhavosti), jejichž principy jsou detailně popsány v teoretické části.

Odběr vzorků probíhal ve dvou fázích. Nejprve byla tavenina připravena z čistého materiálu (100% housky) dané slitiny, nijak neošetřeného avšak odplyněného pomocí odplynovacího zařízení. Posléze byly vzorky odebírány z taveniny se složením 60% čisté housky a 40% vratný materiál. Pro odplynění byla použita krycí sůl Probat Plus Al224.

**Tabulka č. 7** Informace o natavení materiálu

Měření	Typ slitiny	Čas nalití pece	Vratný materiál	Čisté housky
A)	EN AC-43 100	23:00	40%	60%
B)	EN AC-42 100	2:30	40%	60%
C)	EN AC-42 100	2:10	0%	100%
D)	EN AC-43 100	0:15	0%	100%

Kvalita taveniny byla kontrolována v průběhu dvanácti hodin s hodinovým intervalem. Každou hodinu byl odebrán jeden vzorek pro každou zkoušku, s výjimkou Dichte Indexu (vzorek pro měření naplynění byl odebrán 3x v průběhu měření). Lze tedy sledovat provázanost mezi jednotlivými zkouškami. Řazení odběru jednotlivých vzorků za sebou a jejich časovou náročnost zobrazuje následující tabulka. Tento postup odebírání byl aplikován na oba typy slitin.

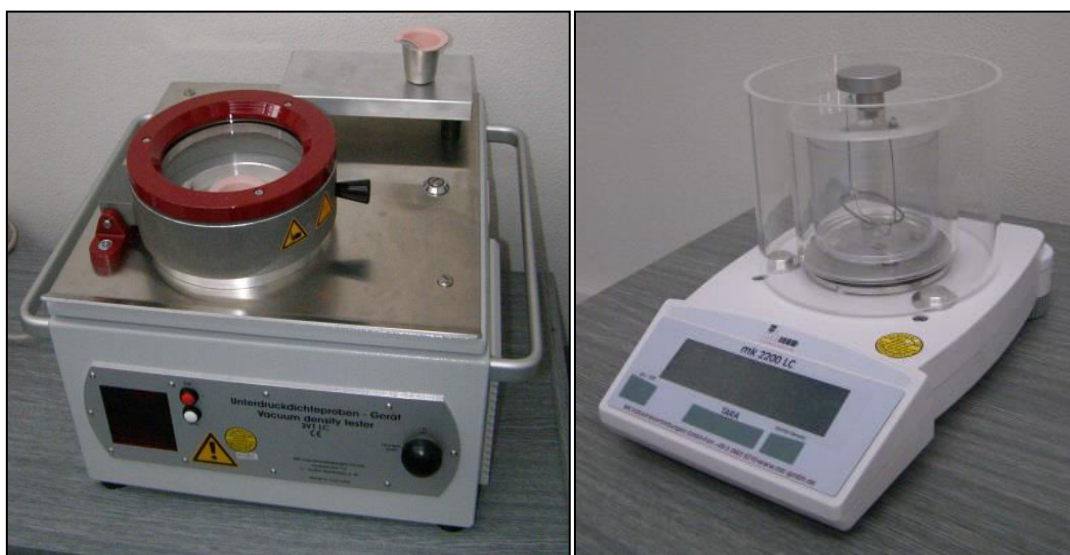
**Tabulka č. 8** Sled jednotlivých zkoušek a jejich časová náročnost

Pořadí vzorku	Typ zkoušky	Doba trvání zkoušky
1. vzorek	Spektrální analýza	5 minut
3. vzorek	Drosstest	8 minut
4. vzorek	Zkouška zabíhavosti	3 minut
5. vzorek	Dichte index	4 minuty
Σ		20 minut

## 6.2 Popis principu odběru vzorků pro jednotlivé zkoušky

### 6.2.1 Dichte index

Vzorek pro zjištění naplynění byl odebírán na začátku měření, pak po šesti hodinách od začátku měření a na konci měření. Měření probíhalo na zařízení 3VT LC po dobu 4 minut. Jeden vzorek tuhl v kelímku za tlaků 80 mbar ( $\pm 1$  mbar) umístěný uvnitř zařízení. Druhý vzorek tuhl za běžných okolních podmínek (teplota okolí 22°C a tlak 1 atm). Po dokonalém utužení a vychladnutí byly oba vzorky jednotlivě zváženy pomocí digitální váhy (viz obr. 33). Bezprostředně po zvážení obou vzorků váhy vyhodnotí naplynění a hodnotu DI zobrazí na displeji.



**Obr. 33** Tlakové zařízení pro zkoušku hustoty s označením 3VT LC a váhy pro vyhodnocení naplynění

### 6.2.2 Spektrální analýza

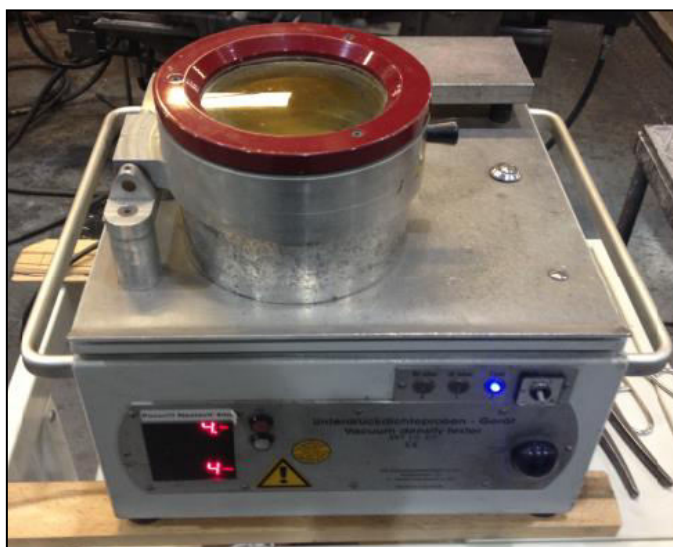
Jako první byl odebírán vzorek pro spektrální analýzu. Vzorek se odlil do kleští s reliéfem kopírující tvar výsledného vzorku (viz obr. 26, str. 37). Následně proběhlo frézování povrchu vzorku v místě s větším průměrem, kvůli odstranění oxidické vrstvy na povrchu, která by mohla nepříznivě ovlivnit výsledek. Tzv. vyjiskření proběhlo na zařízení pro spektrální analýzu s označením Metal – LAB 75 – 80J od výrobce GNR (na obr. 34).



**Obr. 34** Zařízení pro spektrální analýzu Metal – LAB 75 – 80J, GNR

### 6.2.3 Drosstest

Jako druhý byl odebrán vzorek pro Drosstest. Tlaková zkouška Drosstest probíhá na zařízení s označením 3 VT LC DT zapůjčeném od firmy Šebesta - služby slévárnám s.r.o. viz obr. 35.



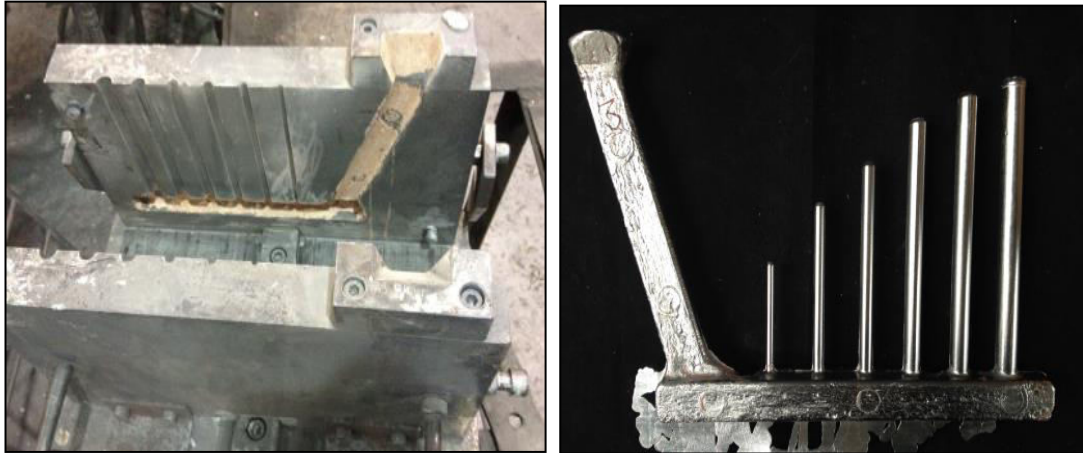
**Obr 35.** Zařízení s označením 3 VT LC DT pro zkoušku Drosstest

V tlakovém zařízení kde byl vzorek umístěn po dobu 8 minut za tlaku 2 až 6 mbar (teorie určuje tlaky menší jak 1 mbar) docházelo k ochlazování vzorku ode dna, což zajišťovalo jeho rovnoměrné tuhnutí. Pro získání většího množství dat pro vyhodnocení vzorků, byl proveden příčný řez vzorkem a jeho plochy metalograficky upraveny broušením.

Dále byly vytvořeny interní etalony, s jejichž pomocí proběhlo porovnání vzorků a odstupňování úrovně čistoty jejich povrchu.

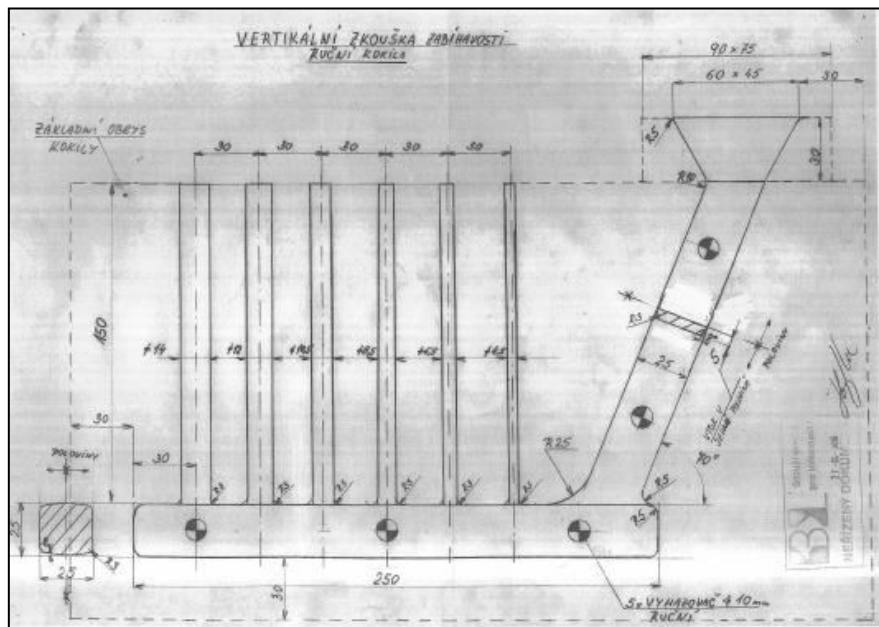
#### 6.2.4 Zkouška zabíhavosti

Během tuhnutí vzorku v zařízení Drosstest byl odlit vzorek do kovové formy pro vertikální zkoušku zabíhavosti. Forma na zabíhavost je konstruována tak, že výšky naplněných válců o různých průměrech podávají informaci o zabíhavosti dané slitiny.



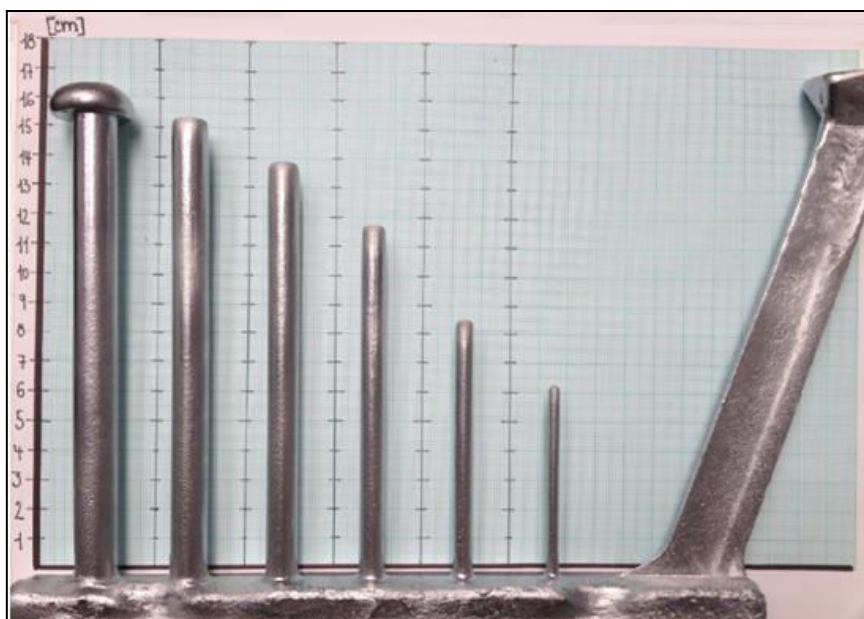
Obr. 36 Forma pro zkoušku zabíhavosti a odlitý vzorek

Forma na zabíhavost nebyla nijak ošetřena, pouze na začátku měření byla vtoková soustava a místa v naříznutí vymazána izolačním nátěrem Steiger WOHO, viz obr. 36.



Obr. 37 Výkres vertikální formy pro zkoušku zabíhavosti

Zabíhavost slitiny se určila pomocí koeficientu zabíhavosti  $Y_z$ . U každého odlitého vzorku se změřila výška vyplněných sloupců (dle obr. 38). Tyto hodnoty, spolu s jednotlivými průřezy sloupců byly dosazeny do vzorce (9).



Obr. 38 Ukázka měření výšky sloupců u odlitého vzorku

## 6.3 Naměřené hodnoty jednotlivých zkoušek

### 6.3.1 Spektrální analýza

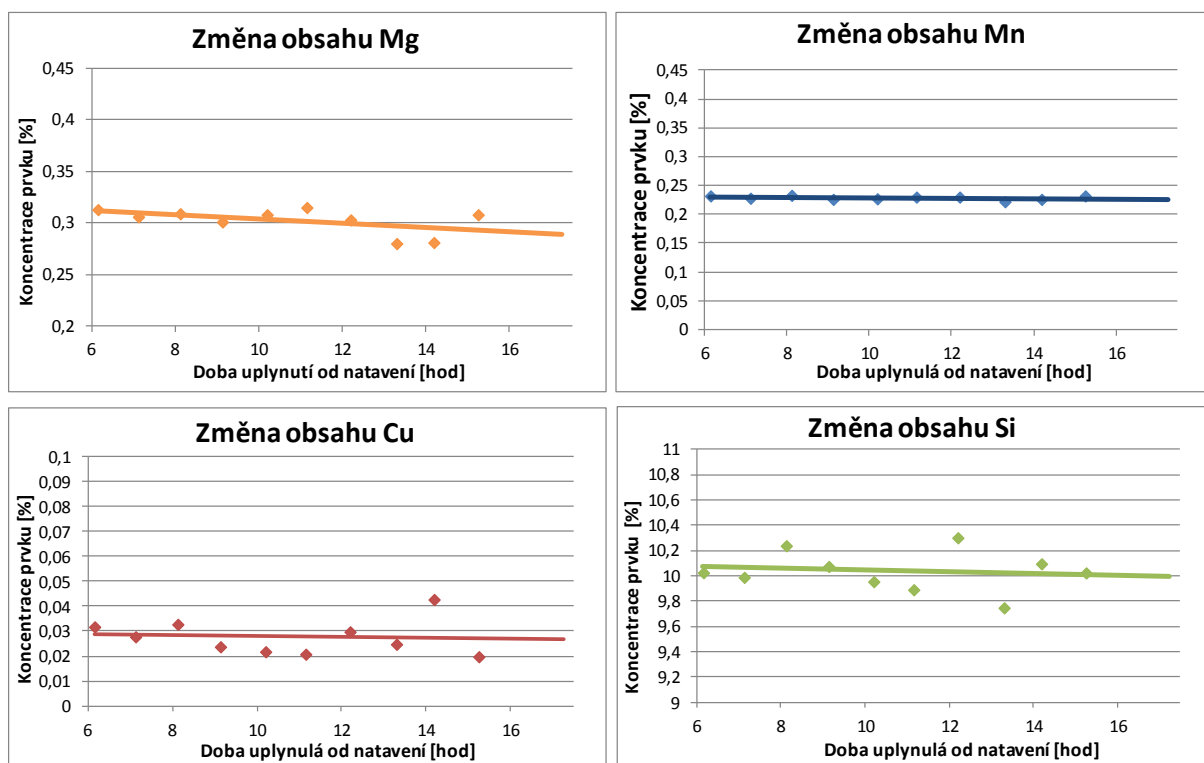
Výstup ze spektrální analýzy představuje tabulka s aktuálním chemickým složením dané slitiny pro každý vzorek. Závislosti, zobrazené vždy pod tabulkou s chemickým složením, prezentují změnu obsahu konkrétního prvku na době udržování taveniny v kelímkové peci od natavení materiálu. Svislá osa závislostí udává procentuelní rozsah koncentrací daného prvku předepsaný normou a na vodorovné ose je uvedena doba uplynulá od natavení materiálu v hodinách.

#### A) Materiál EN AC-43 100 (AlSi10Mg) 60 % housky, 40 % vrat

Tabulka č. 9 Chemické složení slitiny EN AC-43 100 (60/40)

vzorek	Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ni [%]	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sr [%]	Cd [%]	Al [%]	Doba od natavení [hod]	Teplota taveniny [°C]
1	0,346	10,028	0,032	0,232	0,313	0,004	0,061	0,009	0,013	0,144	0	0,002	0	88,813	6,15	739
2	0,345	9,991	0,028	0,228	0,306	0,001	0,034	0,001	0,003	0,139	0	0,002	0	88,922	7,12	741
3	0,346	10,241	0,033	0,233	0,309	0,003	0,046	0,006	0,009	0,145	0	0,002	0	88,626	8,12	740
4	0,337	10,077	0,024	0,226	0,301	0	0,031	0	0	0,141	0	0,002	0	88,86	9,13	740
5	0,349	9,957	0,022	0,227	0,308	0	0,018	0	0	0,138	0	0,002	0	88,978	10,2	734
6	0,353	9,893	0,021	0,23	0,315	0,001	0,024	0	0	0,142	0	0,002	0	89,021	11,15	734
7	0,338	10,304	0,03	0,23	0,303	0,001	0,029	0	0,001	0,14	0	0,002	0	88,623	12,2	734
8	0,337	9,75	0,025	0,222	0,28	0,003	0,045	0,007	0,007	0,135	0	0,002	0	89,184	13,3	734
9	0,338	10,098	0,043	0,226	0,281	0,004	0,058	0,014	0,014	0,137	0	0,002	0	88,784	14,19	734
10	0,352	10,026	0,02	0,232	0,308	0	0,012	0	0	0,142	0	0,002	0	88,52	15,25	735

Grafické závislosti vybraných prvků:



Obr. 39 Závislosti koncentrace daného prvku slitiny EN AC-43 100 (60/40) na době uplynulé od natavení materiálu

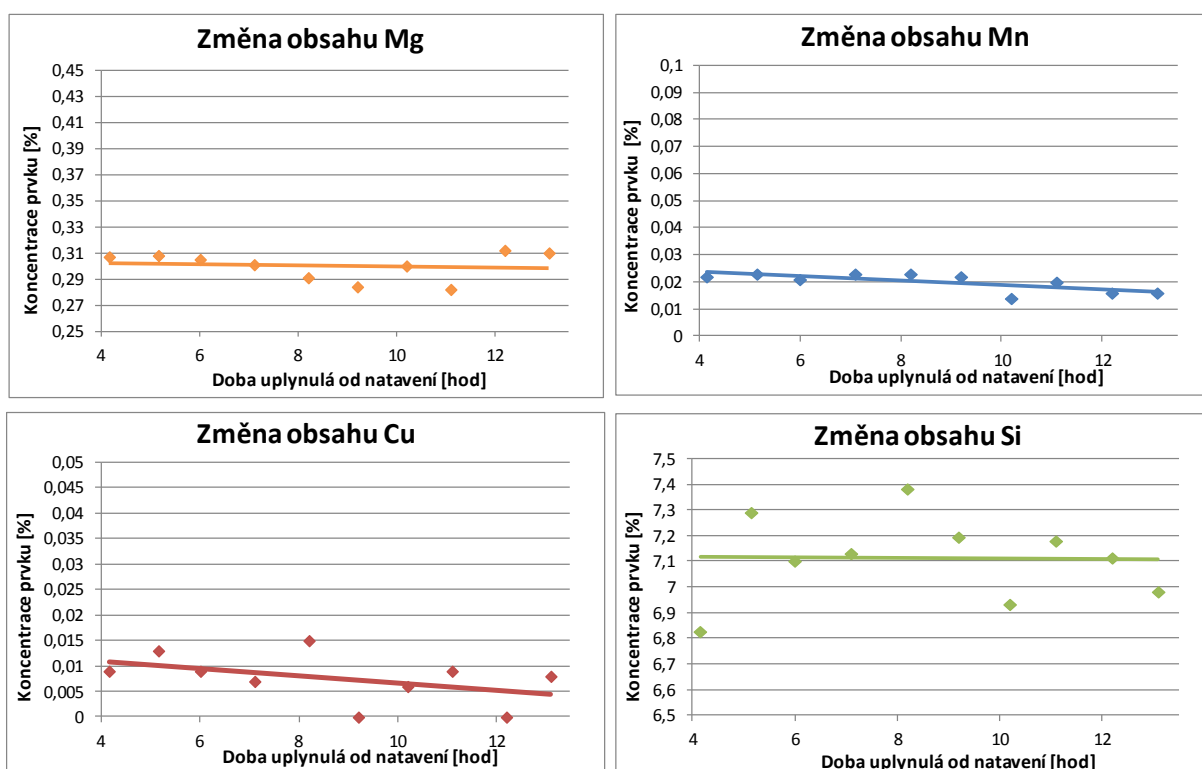
**B) Materiál EN AC-42 100 (AlSi7Mg0,3) 60 % housky, 40 % vrat**

Tabulka č. 10 Chemické složení slitiny EN AC-42 100 (60/40)

vzorek	Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ni [%]	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sr [%]	Cd [%]	Al [%]	Doba od natavení [hod]	Teplota taveniny [°C]
1	0,171	6,825	0,009	0,022	0,307	0,006	0,051	0,025	0,018	0,123	0	0,002	0,001	92,437	4,15	731
2	0,167	7,289	0,013	0,023	0,308	0,004	0,039	0,027	0,021	0,125	0	0,002	0	91,98	5,15	730
3	0,171	7,1	0,009	0,021	0,305	0,003	0,037	0,017	0,014	0,12	0	0,002	0	92,199	6	731
4	0,167	7,129	0,007	0,023	0,301	0,005	0,05	0,029	0,021	0,123	0	0,002	0,001	92,141	7,1	735
5	0,165	7,381	0,015	0,023	0,291	0,005	0,049	0,03	0,025	0,118	0	0,002	0,001	91,894	8,2	733
6	0,165	7,193	0	0,022	0,284	0,006	0,044	0,023	0,021	0,121	0	0,002	0,001	92,119	9,2	736
7	0,168	6,931	0,006	0,014	0,3	0	0,003	0	0	0,118	0	0,001	0	92,458	10,2	732
8	0,163	7,178	0,009	0,02	0,282	0,002	0,026	0,01	0,007	0,118	0	0,002	0	92,182	11,1	737
9	0,17	7,112	0	0,016	0,312	0	0	0	0	0,119	0	0,1	0	92,269	12,2	734
10	0,169	6,98	0,008	0,016	0,31	0	0	0	0	0,121	0	0,001	0	92,382	13,1	733



Grafické závislosti vybraných prvků:



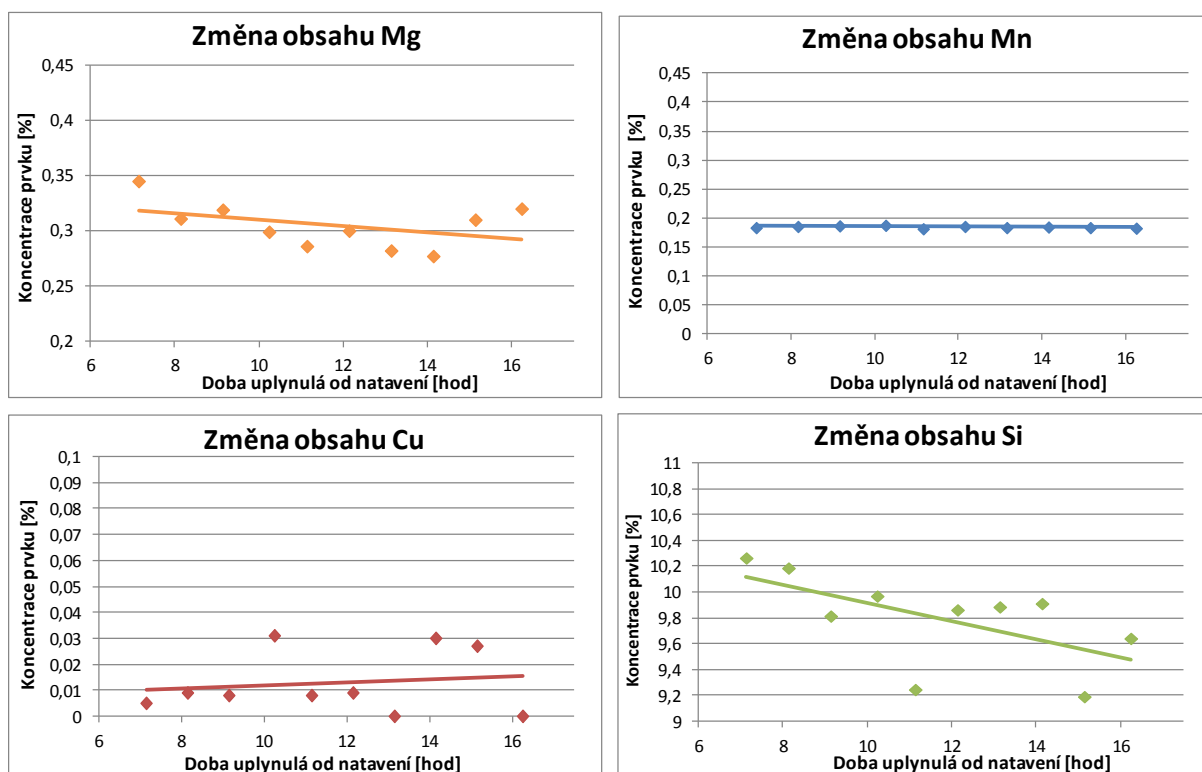
**Obr. 40** Závislosti koncentrace daného prvku slitiny EN AC-42100 (60/40) na době uplynulé od natavení materiálu

**C) Materiál EN AC-43 100 (AlSi10Mg) 100 % housky, 0 % vrat**

**Tabulka č. 11** Chemické složení slitiny EN AC-43 100 (100/0)

vzorek	Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ni [%]	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sr [%]	Cd [%]	Al [%]	Doba od natavení [hod]	Teplota taveniny [°C]
1	0,322	10,264	0,005	0,184	0,345	0	0,005	0,008	0	0,114	0,001	0,002	0	88,553	7,15	731
2	0,321	10,186	0,009	0,186	0,311	0,003	0,044	0,014	0,012	0,111	0	0,003	0	88,598	8,15	735
3	0,327	9,814	0,008	0,187	0,319	0	0,031	0,004	0,001	0,113	0	0,003	0	88,991	9,15	733
4	0,321	9,969	0,031	0,188	0,299	0,004	0,064	0,027	0,021	0,112	0	0,003	0	88,76	10,25	731
5	0,328	9,245	0,008	0,182	0,286	0,007	0,067	0,025	0,018	0,113	0	0,003	0,001	89,516	11,15	736
6	0,323	9,862	0,009	0,186	0,3	0,002	0,042	0,012	0,008	0,112	0	0,003	0	88,942	12,15	732
7	0,313	9,885	0	0,184	0,282	0,004	0,049	0,025	0,02	0,111	0	0,003	0	88,921	13,15	733
8	0,314	9,911	0,03	0,185	0,277	0,005	0,068	0,032	0,026	0,112	0	0,003	0,001	88,835	14,15	736
9	0,325	9,19	0,027	0,184	0,31	0	0,016	0	0	0,117	0	0,003	0	88,844	15,15	738
10	0,32	9,641	0	0,183	0,32	0	0,011	0	0	0,12	0	0,002	0	89,126	16,25	734

Grafické závislosti vybraných prvků:



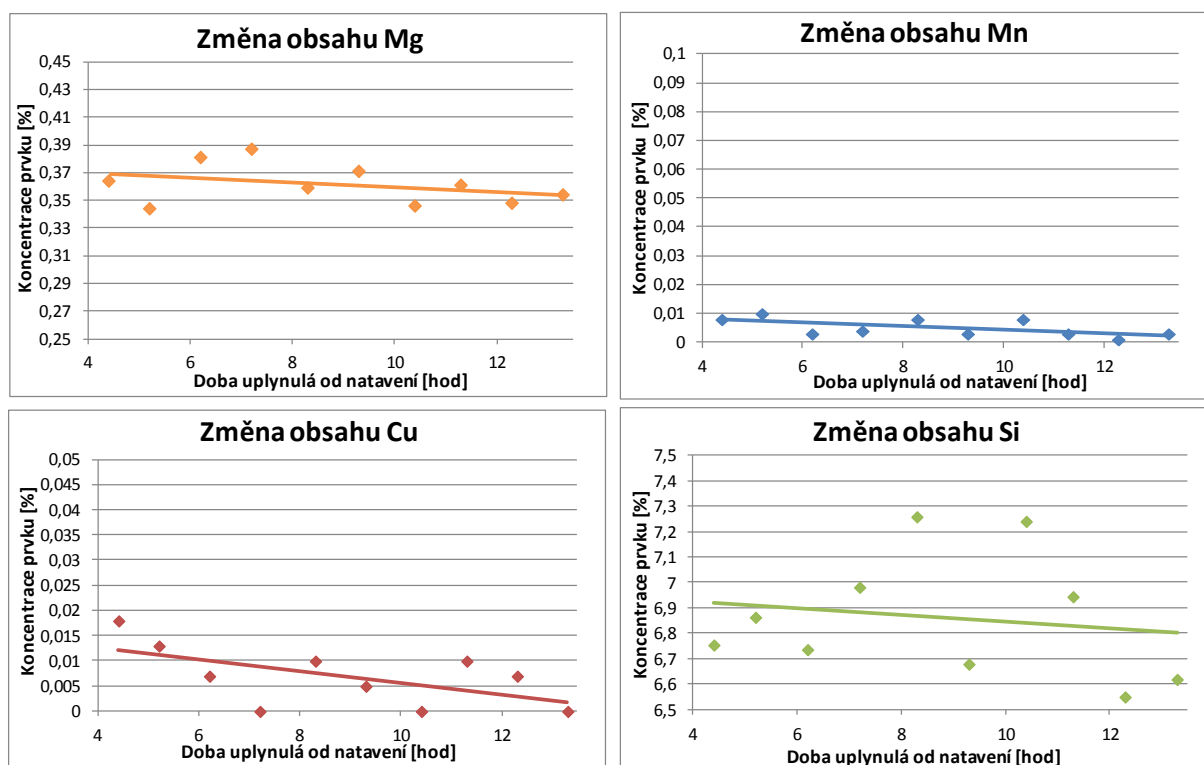
Obr. 41 Závislosti koncentrace daného prvku slitiny EN AC-43100 (100/0) na době uplynulé od natavení materiálu

D) Materiál EN AC-42 100 (AlSi7Mg0,3) 100 % housky, 0 % vrat

Tabulka č. 12 Chemické složení slitiny EN AC-42 100 (100/0)

vzorek	Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ni [%]	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	Ti [%]	Ca [%]	Sr [%]	Cd [%]	Al [%]	Doba od natavení [hod]	Teplota taveniny [°C]
1	0,149	6,753	0,018	0,008	0,364	0,003	0,022	0,008	0,006	0,122	0,001	0,002	0	92,453	4,4	736
2	0,153	6,862	0,013	0,01	0,344	0,006	0,042	0,026	0,02	0,114	0,001	0,002	0,001	92,405	5,2	734
3	0,157	6,735	0,007	0,003	0,381	0	0,003	0	0	0,115	0,001	0,001	0	92,596	6,2	739
4	0,156	6,98	0	0,004	0,387	0	0	0	0	0,117	0,001	0,002	0	92,356	7,2	737
5	0,157	7,257	0,01	0,008	0,359	0,003	0,023	0,012	0,009	0,11	0	0,002	0	92,05	8,3	735
6	0,158	6,678	0,005	0,003	0,371	0	0	0	0	0,114	0	0,001	0	92,671	9,3	738
7	0,143	7,239	0	0,008	0,346	0,002	0,002	0,007	0,007	0,114	0	0,002	0	92,13	10,4	738
8	0,15	6,943	0,01	0,003	0,361	0	0,001	0	0	0,113	0	0,001	0	92,417	11,3	732
9	0,146	6,549	0,007	0,001	0,348	0	0	0	0	0,116	0	0,001	0	92,833	12,3	730
10	0,153	6,618	0	0,003	0,354	0,001	0	0	0	0,113	0	0,001	0	92,756	13,3	733

Grafické závislosti vybraných prvků:



**Obr. 42** Závislosti koncentrace daného prvku slitiny EN AC-42 100 (100/0) na době uplynulé od natavení materiálu

Vyhodnocení:

Spektrální analýzou bylo zjištěno, že více jak dvanácti hodinové udržování taveniny na lici teplotě má vliv na změnu koncentrace vybraných prvků. Pro sestavení závislostí byly vybrány prvky Mn, Si, Cu, Mg z důvodu největšího vlivu na vlastnosti slitiny. Měď a hořčík umožňují vytvrzení slitiny. Slitina po vytvrzení vykazuje vyšší hodnoty pevnosti a tvrdosti. Křemík má vliv na slévárenské vlastnosti slitiny, především na zabíhavost. A obsah manganu je důležité sledovat kvůli kompenzaci škodlivého vlivu železa. Dle závislostí na obr. 39 až 42 byly zjištěny poklesy koncentrací vybraných prvků, které prezentuje tabulka č. 13.

**Tabulka č. 13** Procentuální poklesy vybraných prvků

Materiál / Prvek	Si [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
EN AC-43 100 (60/40)	0,554	0,023	0,004	0,035
EN AC-42 100 (60/40)	0,464	0,015	0,003	0,03
EN AC-43 100 (100/0)	1,077	0,031	0,006	0,068
EN AC-42 100 (100/0)	0,639	0,018	0,007	0,043

Na sestrojených závislostech byl zjištěn klesající trend křivek, s výjimkou u slitiny EN AC-43 100 natavené ze 100 % housek, u které má měď vzrůstající tendenci.

Měď má nejmenší afinitu ke kyslíku ze všech níže uvedených prvků. Tudíž propal mědi je menší, než u prvků s vyšší afinitou ke kyslíku. Vzrůstající trend křivky tedy může vyplývat z hmotnostního úbytku ostatních prvků.

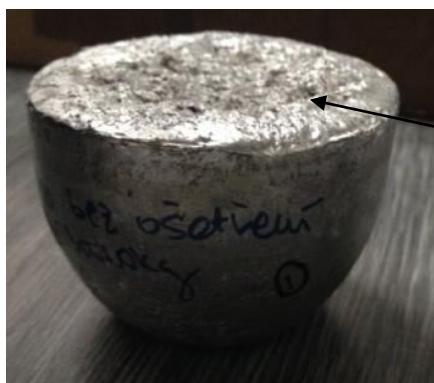
**Cu - Pb - Ni - Sn - Fe - Zn - Na - Mn - Si - Ti - Al - Li - Mg - Be - Ca**

rostoucí afinita prvku ke kyslíku →

Druhé vysvětlení pro vzrůstající tendenci obsahu mědi je v sycení taveniny mědi ze stěn kelímku. Při udržování taveniny s vyšším obsahem mědi, může měď nadifundovat do stěny kelímku. Následně při udržování taveniny s nižším obsahem mědi ve stejném kelímku, se může měď ze stěn kelímku pozvolna uvolňovat a sytit taveninu. Toto jsou ale zatím neprozkoumané závěry, které si vyžadují další experimenty.

### 6.3.2 Drosstest

Na obr. 43 je zobrazená ta část vzorku, která byla podrobena bližšímu zkoumání. Jedná se o horní vrchlík vzorku, kde jsou vlivem varu taveniny (při podtlaku ve vakuovém zařízení) usazeny veškeré nečistoty a oxidy. U vyhovujícího vzorku (kdy je tavenina „čistá“) je povrch hladký, zatímco u nevyhovujícího vzorku (u „znečištěné“ taveniny) je povrch hrbolatý.



zkoumaný povrch  
-  
vrchlík vzorku

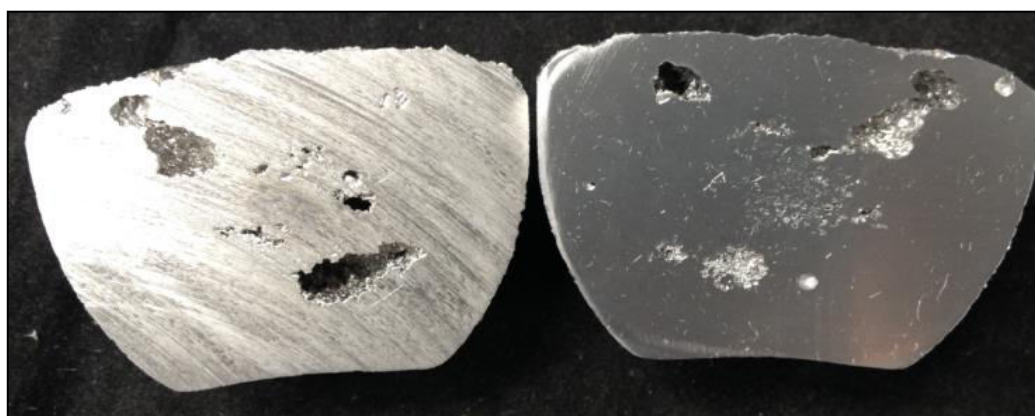
**Obr. 43** Vzorek z Drosstestu

Pro porovnání povrchů vzorků bylo vytvořeno 10 etalonů, které měly různou úroveň znečištění povrchu, odstupňovanou od nejmenšího (1.) k největšímu (10.) znečištění. Podle těchto etalonů byly jednotlivé vzorky porovnávány a dle podobnosti přiřazována úroveň znečištění (1. až 10.). V červeném rámečku na obr. 44 jsou vyznačeny povrchy vzorků, které mají úroveň znečištění povrchu nepřijatelnou.



**Obr. 44** Etalony odstupňované dle úrovně znečištění od nejmenšího (1.) k největšímu (10.)

Vzhledem ke skutečnosti, že není příliš zkušeností s vyhodnocováním vzorků z Drosstestu, byl pro zjištění více informací pro vyhodnocení proveden příčný řez vzorky a následná metalografická úprava vzniklých ploch broušením. Pro broušení byl použit brusný kotouč s postupnou drsností 180, 600, 1200 a 2400 zrn/mm<sup>2</sup>. Následně byla hledána provázanost mezi vnitřními jevy, povrchem vzorku a kvalitou taveniny. Zkoumání vnitřku vzorku si klade za cíl, zjistit zda všechny nečistoty vypluly na povrch. Na obr. 45 je názorná ukázka vzorku po rozříznutí.



**Obr. 45** Vzorek po rozříznutí (vlevo – nevybroušená plocha, vpravo – vybroušená plocha)

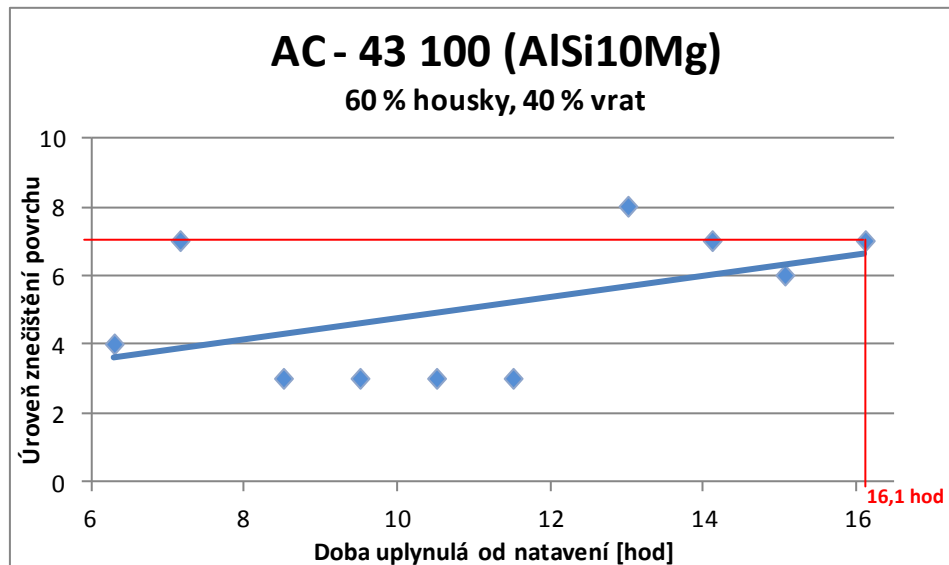
V následujících tabulkách je přehled podmínek, za kterých probíhalo odebírání jednotlivých vzorků a výsledky porovnávání vrchlíku vzorků s etalony. Pod tabulkou je vždy zobrazený graf, který vyjadřuje závislost úrovně znečištění povrchu vzorků na době od natavení materiálu. Limitní mez pro úroveň znečištění povrchu (úroveň č. 7 u etalonů) je v grafických závislostech vyznačena červenou barvou.

**A) Materiál EN AC-43 100 (AlSi10Mg) 60 % housky, 40 % vrat**

**Tabulka č. 14** Naměřené hodnoty z Drosstestu pro slitinu EN AC-43 100 (60/40)

DT	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek
Teplota taveniny [°C]	739	729	733	740	742	745	735	734	732	734
Doba od natavení [hod]	6,29	7,15	8,5	9,5	10,5	11,5	13	14,1	15,05	16,1
Tlak [mbar]	3 až 4	3 až 4	2	2	4	4	4	4	4	3
Úroveň znečištění dle etalonů	4.	7.	3.	3.	3.	3.	8.	7.	6.	7.

Pozn. „Úroveň znečištění“ znamená vyhodnocení povrchu vrchlíků dle vizuální metody.  
1. – nejméně znečištěný povrch, 10. – nejvíce znečištěný povrch.

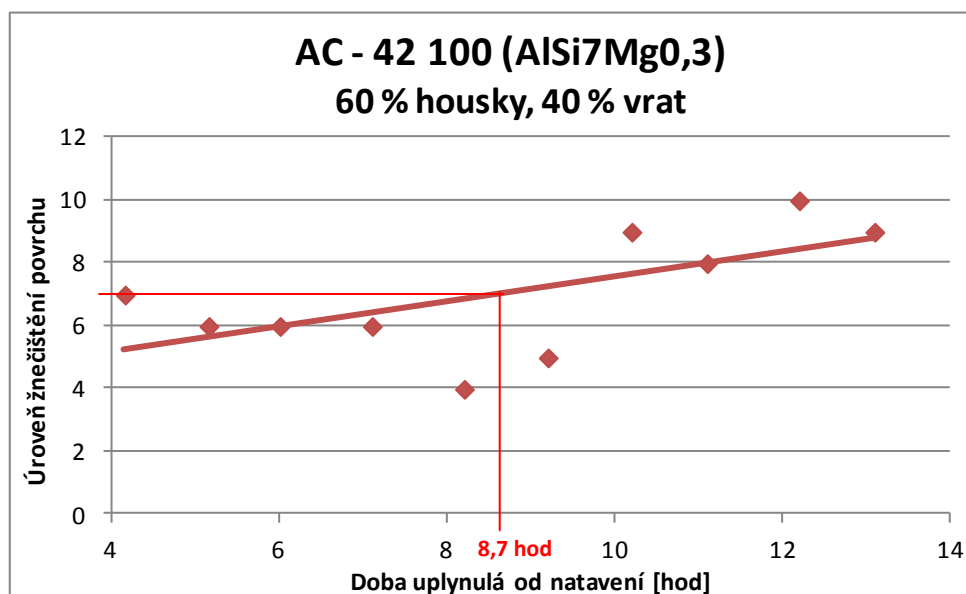


**Obr. 46** Grafická závislost kvality odlitého vzorku na pořadí pro slitinu EN AC-43 100 (60/40)

**B) Materiál EN AC-42 100 (AlSi7Mg0,3) 60% housky, 40% vrat**

**Tabulka č. 15** Naměřené hodnoty z Drosstestu pro slitinu EN AC-42 100 (60/40)

DT	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek
Teplota taveniny [°C]	731	728	724	718	733	729	716	715	721	716
Doba od natavení [hod]	4,15	5,15	6	7,1	8,2	9,2	10,2	11,1	12,2	13,1
Tlak [mbar]	2 až 3	2 až 3	2	4	3	4 až 5	4	4	5	5
Úroveň znečištění dle etalonů	7.	6.	6.	6.	4.	5.	9.	8.	10.	9.

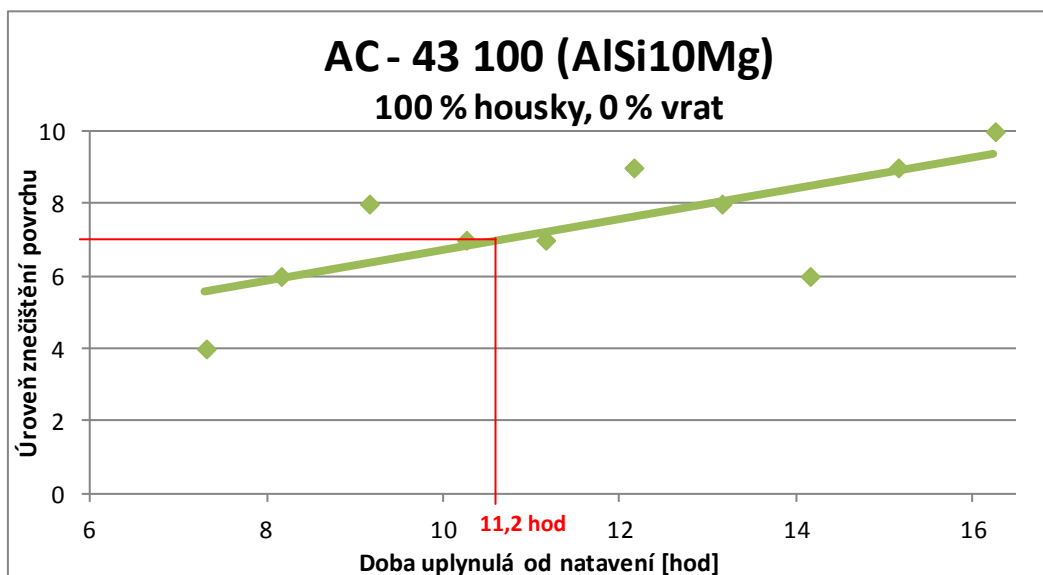


**Obr. 47** Grafická závislost kvality odlitého vzorku na pořadí pro slitinu EN AC-42 100 (60/40)

**C) Materiál EN AC-43 100 (AlSi10Mg) 100% housky, 0% vrat**

**Tabulka č. 16** Naměřené hodnoty z Drosstestu pro slitinu EN AC-43 100 (100/0)

DT	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek
Teplota taveniny [°C]	731	735	733	731	736	732	733	736	738	734
Doba od natavení [hod]	7,3	8,15	9,15	10,25	11,15	12,15	13,15	14,15	15,15	16,25
Tlak [mbar]	3	2	3	4	4	5	4	5	3	5 až 6
Úroveň znečištění dle etalonů	4.	6.	8.	7.	7.	9.	8.	6.	9.	10.



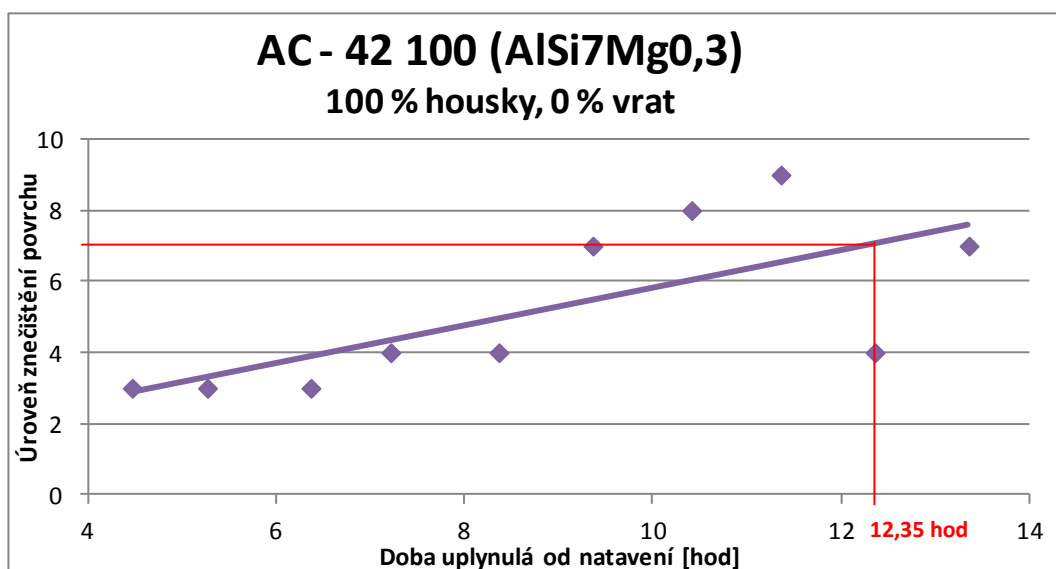
**Obr. 48** Grafická závislost kvality odlitého vzorku na pořadí pro slitinu ENAC-43 100 (100/0)



**D) Materiál EN AC-42 100 (AlSi7Mg0,3) 100% housky, 0% vrat**

**Tabulka č. 17** Naměřené hodnoty z Drosstestu pro slitinu EN AC-42 100 (100/0)

DT	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek
Teplota taveniny [°C]	736	734	739	737	735	738	738	732	730	733
Doba od natavení [hod]	4,45	5,25	6,35	7,2	8,35	9,35	10,4	11,35	12,35	13,35
Tlak [mbar]	3	3	4	4	4 až 5	4 až 5	5	4	5	5 až 6
Úroveň znečištění dle etalonů	3.	3.	3.	4.	4.	7.	8.	9.	4.	7.



**Obr. 49** Grafická závislost kvality odlitého vzorku na pořadí pro slitinu EN AC-42 100 (100/0)

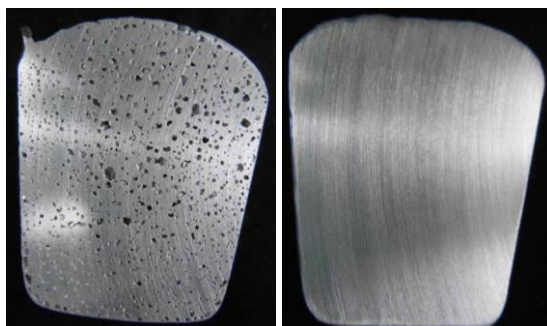
Vyhodnocení

Ze sestrojených závislostí je zřejmá vzrůstající úroveň znečištění povrchu vzorků s dobou od natavení. Empiricky stanovená limitní hodnota úrovně znečištění protíná vzniklou křivku v časech blízkých hraniční dvanácté hodiny od natavení.

Teorie udává, že při měření metodou Drosstest při tlaku pod 1 mbar by měl být vzorek uvnitř čistý, bez vad. Po provedení řezu se ale ukázalo, že uvnitř vzorku jsou usazené nečistoty, perezita a bubliny. Příčina těchto defektů, může mít odůvodnění v zapůjčeném zařízení s označením 3 VT LC DT, což byla prototypová verze, která nebyla stavěná na intenzivní odebrání vzorků. Odebírání vzorků s hodinovým rozestupem mělo za následek přehřívání čerpadla uvnitř zařízení. Funkce čerpadla měla vliv na činnost vakuovacího zařízení, čímž docházelo k postupnému narůstání hodnot tlaků, až na 6 mbar. Výsledkem je, že vlivem vyšších tlaků (2 až 6 mbar) což jsou hodnoty blízké pro měření metodou Straube-Pfeifer, neměly nečistoty dostatečný prostor k vyplavání na povrch a zůstaly uzavřené uvnitř vzorku.

### 6.3.3 Dichte Index

Index hustoty informuje o naplynění taveniny. Naplynění je, až na výjimky, u odlitků nežádoucí. Na obr. 51 je řez dvou vzorků. Na vzorku vlevo, kde je hodnota DI = 17 %, jsou znatelné plynové póry ve struktuře, které v takovéto míře mohou snižovat mechanické vlastnosti odlitku. Na druhou stranu, se naplynění taveniny účelně využívá pro rozptýlení a rozmělnění určitých typů porezity, vznikající u odlitků. Na vzorku vpravo s hodnotou DI = 1 % nejsou znatelné žádné póry a vzorek vykazuje dokonalé odplynění.



**Obr. 51** Struktura vzorku pro zjištění naplynění taveniny (vlevo DI = 17 %, vpravo DI = 1 %)

Následující tabulky č. 18- 21 poskytují naměřené údaje indexu hustoty pro jednotlivé slitiny.

#### A) Materiál EN AC-43 100 (AlSi10Mg) 60% housky, 40% vrat

**Tabulka č. 18** Naměřené hodnoty indexu hustoty pro EN AC-43 100 (60/40)

DI	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Teplota taveniny [°C]	740	735	733
Doba od natavení [hod]	6,21	11,3	14,5
Hodnota indexu hustoty [%]	1,14	0,74	1,14

#### B) Materiál EN AC-42 100 (AlSi7Mg0,3) 60% housky, 40% vrat

**Tabulka č. 19** Naměřené hodnoty indexu hustoty pro EN AC-42 100 (60/40)

DI	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Teplota taveniny [°C]	731	735	721
Doba od natavení [hod]	4,15	11,1	13,1
Hodnota indexu hustoty [%]	2,27	2,64	1,61

#### C) Materiál EN AC-43 100 (AlSi10Mg) 100% housky, 0% vrat

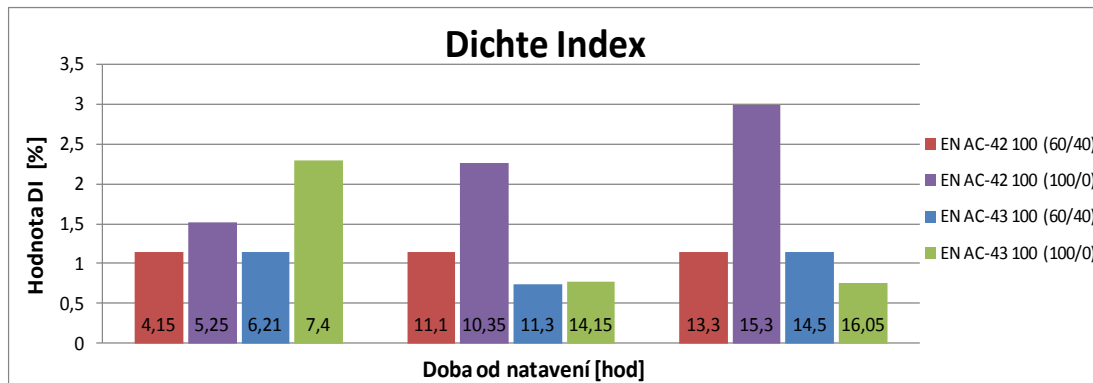
**Tabulka č. 20** Naměřené hodnoty indexu hustoty pro EN AC-43100 (100/0)

DI	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Teplota taveniny [°C]	735	736	739
Doba od natavení [hod]	7,4	14,15	16,05
Hodnota indexu hustoty [%]	2,29	0,77	0,75

**D) Materiál EN AC-42 100 (AlSi7Mg0,3) 100% housky, 0% vrat**

**Tabulka č. 21** Naměřené hodnoty indexu hustoty pro EN AC-42 100 (100/0)

DI	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Teplota taveniny [°C]	736	738	737
Doba od natavení [hod]	5,25	10,35	15,3
Hodnota indexu hustoty [%]	1,52	2,27	3



**Obr. 52** Grafická závislost hodnoty naplynění na době od natavení

Vyhodnocení

Závislost Dichte Indexu u slitiny EN AC-42 100 natavené ze 100 % housky je během udržování materiálu v peci vzrůstající, což vypovídá o vzrůstajícím obsahu plynů a nečistot v tavenině. Navzdory očekávání jsou hodnoty u slitin EN AC-43 100 a EN AC-42 100 natavených z 60 % housky a 40 % vratného materiálu téměř konstantní. Dokonce u slitiny EN AC-43 100 natavené ze 100 % čistých housky je zaznamenána klesající tendence oproti předpokladu.

### 6.3.4 Zabíhavost

Zabíhavost taveniny ovlivňuje celá řada faktorů (např. teplota a ošetření kokily, konstrukce odlitku, teplota lázně, chemické složení materiálu, obsah oxidů a vměstků v tavenině, rychlost lití, atd.). Proto bylo během odlévání vzorků důsledně dohlíženo na tyto faktory:

- teplota taveniny před odlitím každého vzorku byla v rozmezí  $735 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
- teplota kokily nepřesahovala rozsah  $350 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- ošetření formy proběhlo vždy před začátkem měření

Teplota kokily byla měřena paprskovým pyrometrem a teplota taveniny byla měřena ponorným pyrometrem. Naměřené hodnoty teplot udává následující tabulka č. 22.

**Tabulka č. 22** Teplota kokily pro jednotlivé vzorky v průběhu lití

Teplota kokily [°C]	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek
AC-43 100 (60/40)	352	338	346	359	348	356	346	357	358	360
AC-42 100 (60/40)	340	349	338	355	349	359	341	339	337	355
AC-43 100 (100/0)	342	350	357	337	361	365	364	340	360	358
AC-42 100 (100/0)	344	358	354	364	346	337	338	340	350	363

Vyhodnocení probíhalo na základě výpočtu koeficientu zabíhavosti  $Y_Z$ , který se vypočítá dle následujícího vzorce [26]:

$$Y_Z = \frac{L_1}{S_1} + \frac{L_2}{S_2} + \frac{L_3}{S_3} + \frac{L_4}{S_4} + \frac{L_5}{S_5} + \frac{L_6}{S_6} \quad [mm^{-1}], \quad (9)$$

kde  $L_n$  ... představuje výšku sloupce u odlitého vzorku

$S_n$  ... představuje průřez sloupce ve formě

Hodnoty zadávaných průměrů a délek sloupců udává tabulka č. 23.

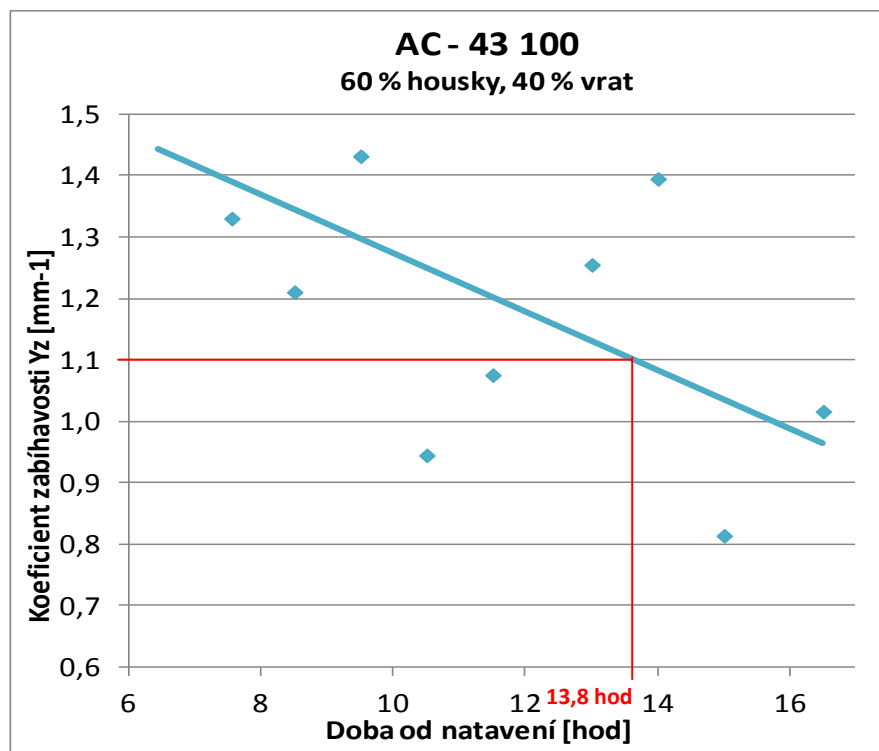
**Tabulka č. 23** Hodnoty zadávané pro výpočet koeficientu  $Y_Z$

Sloupec	1. sloupec	2. sloupec	3. sloupec	4. sloupec	5. sloupec	6. sloupec
Průměr [mm]	4,5	6,5	8,5	10,5	12	14
Průřez [mm <sup>2</sup> ]	15,896	33,166	56,72	86,55	113,04	153,86

**A) Materiál EN AC-43 100 (AlSi10Mg) 60 % housky, 40 % vrat**

**Tabulka č. 24** Hodnoty koeficientu  $Y_z$  pro jednotlivé vzorky slitiny EN AC-43 100 (60/40)

Koeficient zabíhavosti	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek	
Teplota taveniny [°C]	740	725	735	735	741	737	738	733	734	735	
Doba od natavení [hod]	6,45	7,55	8,5	9,5	10,5	11,5	13	14	15	16,5	
43 100 40 % 60 %	1. sloupec	0,623	0,384	0,365	0,428	0,208	0,289	0,340	0,409	0,208	0,277
	2. sloupec	0,374	0,305	0,268	0,347	0,214	0,247	0,268	0,329	0,142	0,211
	3. sloupec	0,257	0,233	0,197	0,247	0,166	0,180	0,236	0,247	0,141	0,171
	4. sloupec	0,177	0,176	0,155	0,177	0,129	0,141	0,177	0,177	0,117	0,146
	5. sloupec	0,135	0,135	0,127	0,135	0,129	0,122	0,135	0,135	0,108	0,119
	6. sloupec	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099	0,097	0,099	0,099	0,099	0,093
$Y_z$ [mm-1]	1,666	1,331	1,211	1,433	0,945	1,076	1,256	1,396	0,814	1,017	

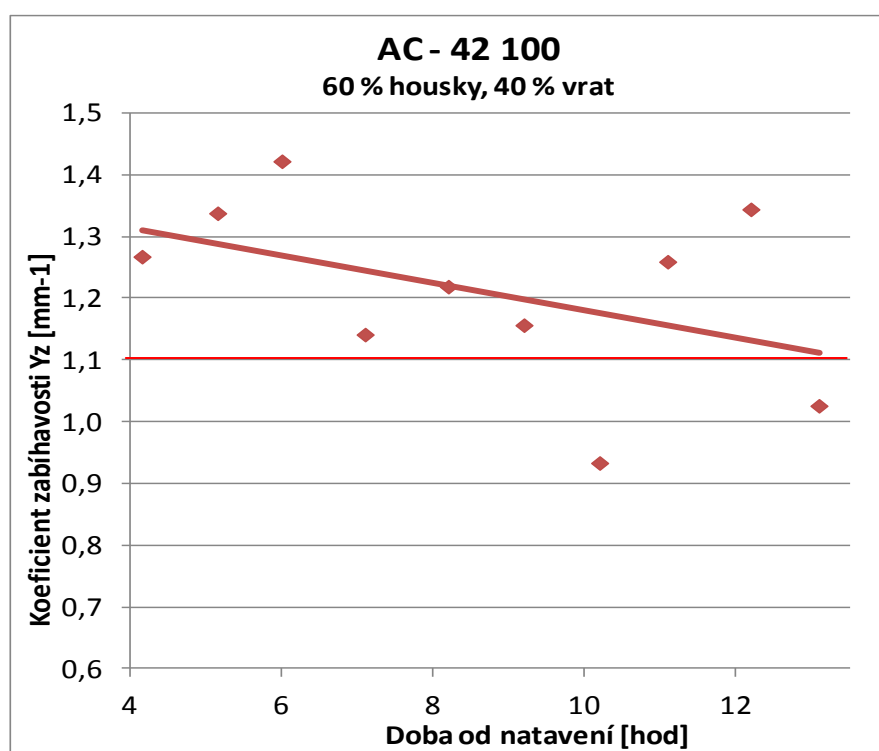


**Obr. 53** Grafická závislost koeficientu zabíhavosti na době od natavení materiálu

**B) Materiál EN AC-42 100 (AlSi7Mg0,3) 60 % housky, 40 % vrat**

**Tabulka č. 25** Hodnoty koeficientu  $Y_z$  pro jednotlivé vzorky slitiny EN AC-42 100 (60/40)

Koeficient zabíhavosti	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek	
Teplota taveniny [°C]	731	735	733	741	736	732	733	736	744	734	
Doba od natavení [hod]	4,15	5,15	6	7,1	8,2	9,2	10,2	11,1	12,2	13,1	
42 100 40 % 60 %	1. sloupec	0,396	0,421	0,453	0,340	0,377	0,346	0,258	0,365	0,421	0,271
	2. sloupec	0,271	0,295	0,320	0,244	0,253	0,253	0,190	0,268	0,311	0,217
	3. sloupec	0,205	0,219	0,238	0,189	0,206	0,182	0,146	0,220	0,213	0,171
	4. sloupec	0,161	0,168	0,177	0,134	0,153	0,146	0,119	0,171	0,164	0,142
	5. sloupec	0,135	0,135	0,135	0,135	0,130	0,133	0,129	0,135	0,135	0,127
	6. sloupec	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099	0,097	0,091	0,099	0,099	0,099
$Y_z$ [mm <sup>-1</sup> ]	1,268	1,338	1,422	1,141	1,219	1,157	0,933	1,259	1,344	1,026	

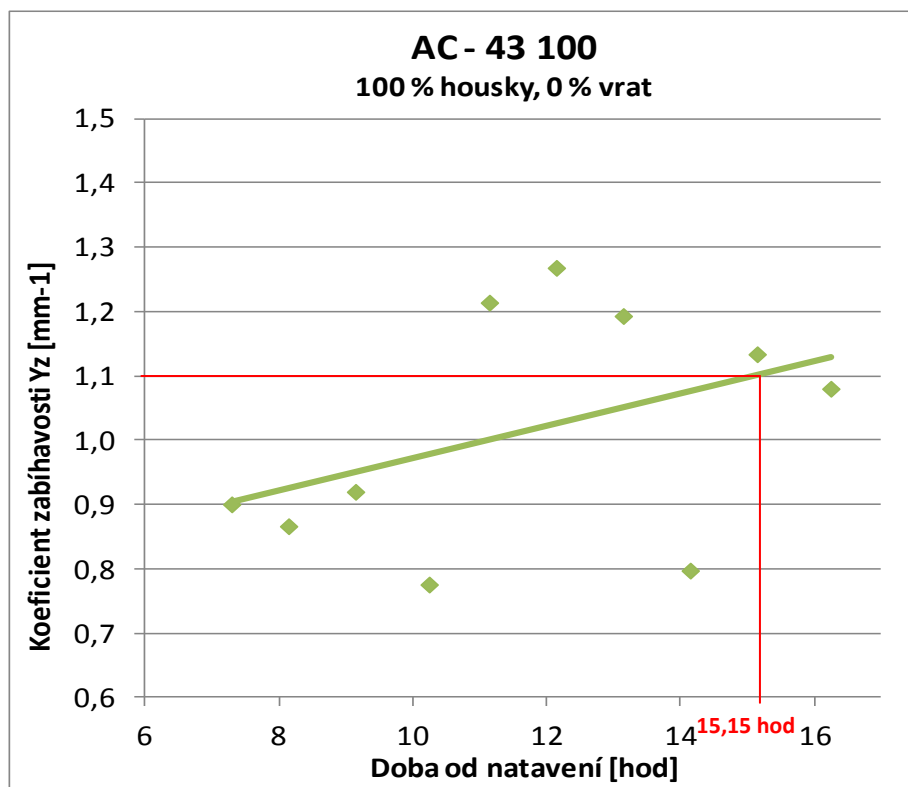


**Obr. 54** Grafická závislost koeficientu zabíhavosti na době od natavení materiálu

**C) Materiál EN AC-43 100 (AlSi10Mg) 100 % housky, 0 % vrat**

**Tabulka č. 26 Hodnoty koeficientu  $Y_z$  pro jednotlivé vzorky slitiny EN AC-43100 (100/0)**

Koeficient zabíhavosti	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek	
Teplota taveniny [°C]	731	742	734	738	733	739	736	741	731	736	
Doba od natavení [hod]	7,3	8,15	9,15	10,25	11,15	12,15	13,15	14,15	15,15	16,25	
43 100 100 % 0 %	1. sloupec	0,245	0,233	0,233	0,189	0,352	0,421	0,384	0,138	0,359	0,359
	2. sloupec	0,181	0,175	0,181	0,154	0,250	0,250	0,238	0,178	0,238	0,223
	3. sloupec	0,130	0,127	0,141	0,116	0,199	0,192	0,180	0,130	0,169	0,164
	4. sloupec	0,122	0,119	0,139	0,117	0,177	0,169	0,156	0,126	0,146	0,133
	5. sloupec	0,121	0,114	0,127	0,101	0,135	0,135	0,135	0,125	0,122	0,113
	6. sloupec	0,099	0,098	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099	0,088
$Y_z$ [mm <sup>-1</sup> ]	0,900	0,866	0,919	0,775	1,213	1,267	1,193	0,797	1,133	1,080	

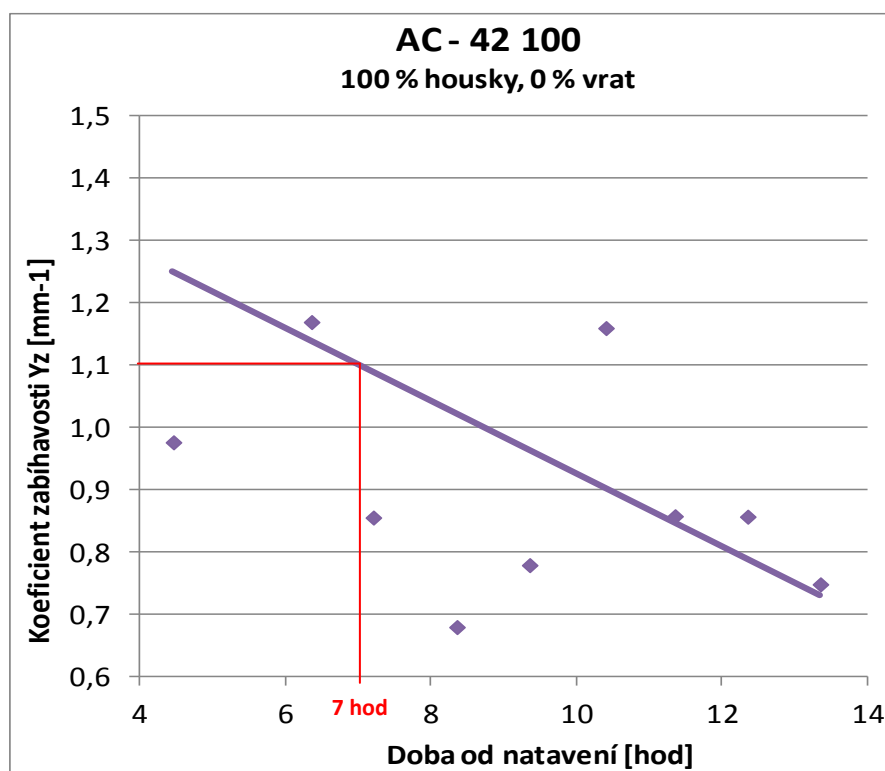


**Obr. 55 Grafická závislost koeficientu zabíhavosti na době od natavení materiálu**

**D) Materiál EN AC-42 100 (AlSi7Mg0,3) 100 % housky, 0 % vrat**

**Tabulka č. 27** Hodnoty koeficientu  $Y_z$  pro jednotlivé vzorky slitiny EN AC-42 100 (100/0)

Koeficient zabíhavosti	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	4. vzorek	5. vzorek	6. vzorek	7. vzorek	8. vzorek	9. vzorek	10. vzorek	
Teplota taveniny [°C]	736	743	739	737	735	738	738	742	730	733	
Doba od natavení [hod]	4,45	5,25	6,35	7,2	8,35	9,35	10,4	11,35	12,35	13,35	
42 100 100 % 0 %	1. sloupec	0,283	0,717	0,327	0,189	0,145	0,176	0,390	0,233	0,226	0,214
	2. sloupec	0,190	0,458	0,271	0,163	0,142	0,190	0,229	0,178	0,169	0,142
	3. sloupec	0,129	0,270	0,182	0,141	0,102	0,127	0,169	0,122	0,127	0,097
	4. sloupec	0,141	0,177	0,155	0,136	0,097	0,106	0,142	0,127	0,125	0,111
	5. sloupec	0,134	0,135	0,135	0,127	0,100	0,096	0,130	0,099	0,116	0,097
	6. sloupec	0,099	0,099	0,099	0,099	0,094	0,084	0,099	0,099	0,094	0,088
$Y_z$ [mm-1]	0,977	1,857	1,170	0,856	0,680	0,779	1,160	0,858	0,857	0,749	



**Obr. 56** Grafická závislost koeficientu zabíhavosti na době od natavení materiálu

Vyhodnocení

Zkouška zabíhavosti je vyhodnocena pomocí koeficientu zabíhavosti, který se s postupem času udržování taveniny na lici teplotě snižuje a s tím se zabíhavost slitiny zhoršuje. U materiálu EN AC-43 100 nataveného ze 100 % housky došlo k nepředvídatelnému zásahu do ošetření formy pro zkoušku zabíhavosti. Celá forma (licí jamka, vtokový kůl, rozváděcí kanál i zkušební sloupce) byla ošetřena postřikem na grafitové bázi, usnadňující tavenině dokonalé vyplnění tvaru. Tento zásah do měření proběhl po jedenácti hodinách od natavení a je patrný na grafické závislosti na obr. 55. Od natavení do zlomové jedenácté hodiny mají



koeficienty zabíhavosti klesající tendenci. V okamžiku ošetření formy (11 hodin od natavení) hodnota koeficientů náhle vzroste, což má za následek i výsledný vzrůstající trend křivky.

Limitní hodnota koeficientu zabíhavosti, která představuje přípustnou zabíhavost pro jednotlivé vzorky, je empiricky stanovena na hodnotu  $Y_z = 1,1 \text{ mm}^{-1}$ . Slitina s nižší hodnotou koeficientu  $Y_z$  než  $1,1 \text{ mm}^{-1}$  vykazuje provozně nevyhovující zabíhavost.

## 7 Doporučení pro praxi

Naměřené výsledky potvrdily stanovený časový limit (12 hodin), kdy je natavený materiál prohlášený za kvalitativně nepostačující. Prokázaly to sestrojené závislosti jednotlivých zkoušek, do kterých byly vyneseny stanovené limitní hodnoty vztažené ke konkrétnímu měření. Tyto hraniční hodnoty stanovují přípustnou mez, kdy je vzorek vyhovující či nikoliv s přímou vazbou na dobu uplynulou od natavení materiálu v peci. Materiál bez metalurgických úprav, jako je dolegování, rafinace a odplynění nebo bez naředění čerstvě připraveným materiálem jej není možné použít.

U spektrální analýzy, kde se zjišťoval pokles obsahu vybraných prvků, jsou meze dány normou. Pro ostatní zkoušky byly limitní hodnoty empiricky stanoveny. Odlitý vzorek pomocí zkoušky Drosstest, který byl dle etalonu ohodnocen 7. úrovní znečištění povrchu, byl již prohlášen za nevyhovující, viz obr. 44. U zkoušky zabíhavosti byl mezní koeficient zabíhavosti s hodnotou nižší jak 1,1.

V praxi je běžné, že neodplyněná tavenina dosahuje hodnot 5 – 7 % DI, po odplynění vykazuje hodnoty DI v rozmezí 0,5 – 1,5 %. V průběhu testování, až po 15,3 hodinách od natavení byla naměřena nejvyšší hodnota Dichte indexu 3 %, což je v běžné slévárenské praxi považováno za akceptovatelnou hodnotu.

## 8 Závěr

Záměrem této práce bylo v teoretické části rekapitulovat poznatky o hliníkových slitinách, konkrétně o slitinách Al-Si a teoreticky podložit provedený experiment, který vznikl pod záštitou slévárny Beneš a Lát, a.s.

V praktické části byl popsán průběh experimentu, který se zabýval zjišťováním kvality nataveného materiálu v závislosti na délce udržování v elektrické odporové kelímkové peci. Sledovány byly dvě vybrané slitiny – AlSi10Mg (EN AC-43 100) a AlSi7Mg0,3 (EN AC-42 100) s různým poměrem vratného materiálu a čistých housek. Nejprve byly obě slitiny nataveny z 60 % čistých housek a 40 % vratného materiálu a při dalším zkoušení byla tavenina tvořena ze 100 % čistých housek. Tavenina byla podrobena analýze pomocí čtyř metod; spektrální analýzy, Drosstestu, Dichte Indexu a zkoušky zabíhavosti.

Výsledky měření v experimentální části potvrdily hypotézu, že kvalita taveniny se změnou času udržování v kelímkové peci klesá. Ze závěrů plynoucích z výsledků zjištěných pomocí spektrální analýzy jsou zřejmé úbytky prvků křemíku, hořčíku, manganu i mědi.

Změnu kvality taveniny podkládají i další zkoušky. Pomocí zařízení Drosstest byla zjišťována míra obsahu oxidických vměstků taveniny. Pro vyhodnocení této zkoušky byly vytvořeny etalony, podle kterých probíhalo posuzování úrovně vyloučení vměstků na povrchu odlitých vzorků. Z hodnot přiřazených jednotlivým vzorkům a ze sestrojených závislostí je patrné, že obsah vměstků v tavenině se zvyšuje s narůstajícím časem setrvávání taveniny v peci.

Pomocí Indexu hustoty (DI) bylo zjišťováno naplynění taveniny. Pouze u materiálu EN AC-42 100 nataveného ze 100 % čistých housek jsou hodnoty vzrůstající. Ostatní materiály měly hodnoty DI v čase po natavení oproti předpokladu téměř konstantní anebo klesající.

Zkouška zabíhavosti poskytuje informace o schopnosti taveniny za daných podmínek vyplnit formu. Výsledky z této zkoušky přepočtené na koeficient zabíhavosti zobrazený na grafických závislostech na obr. 53, 54 a 56 mají klesající tendenci. Z toho vyplývá, že zabíhavost slitiny klesá s vzrůstající dobou udržování taveniny na lící teplotě.

Závěrem lze konstatovat, že provázanost výsledků je zřejmá z výsledků ze zkoušky zabíhavosti s výsledky z předchozích zkoušek, především z Drosstestu. Zde bylo prokázáno, že s přibývajícím časem udržování taveniny v udržovací peci vzrůstá obsah vměstků, které mohou mít negativní vliv na zabíhavost taveniny. Také lze zmínit výsledky ze spektrální analýzy, kde byl zjištěn úbytek křemíku, který příznivě ovlivňuje zabíhavost.

## Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin a neželezných kovů: návody do cvičení*. 1. vyd. Brno: VUT, 1984
- [2] ČSN EN 1706. *Hliník a slitiny hliníku – Odlitky - Chemické složení a mechanické vlastnosti*. 2004. vyd.
- [3] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Rudolf KOŘENÝ, Vladivoj OTČENÁŠEK a Rudolf KOŘENÝ. A KOL. *Encyklopedie hliníku*. ISBN 80-89041-88-4
- [4] *Collections of phase diagrams: SGTE - SGTE Alloy Phase Diagrams* [online]. [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: [http://www.crct.polymtl.ca/fact/phase\\_diagram.php?file=Al-Si.jpg](http://www.crct.polymtl.ca/fact/phase_diagram.php?file=Al-Si.jpg)
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [6] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1.
- [7] BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Studium modifikačního účinku různých typů čínidel na bázi stroncia ve slitinách Al-Si*. Praha, 2011. 148 s. Doktorská práce (Ph.D.). České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [8] Trimet Prag s.r.o. [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: [http://www.trimet.cz/cz/sekundarni\\_vyroba.php](http://www.trimet.cz/cz/sekundarni_vyroba.php)
- [9] JAROSLAV, Doležal a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. Vedlejší přísadové a doprovodné prvky ve slitinách Al-Si. In: *Sborník příspěvků 6. Holečkovy konference Metalurgie a technologie slitin neželezných kovů: 18.-19. března 2015, Resort Devět Skal*. Vyd. 1. Brno: Česká slévárenská společnost, 2015, s. 9. ISBN 978-80-02-02587-0.
- [10] Nové obrobitelné slitiny hliníku bez olova. *MM Průmyslové spektrum: Inovace - Materiály* [online]. 2001/7 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-obrobitelne-slitiny-hliniku-bez-olova.html>
- [11] PRUKKANON, Wattanachai; SRISUKHUMBOWORNCHAI, Nakorn; LIMMANEEVICHITR, Chaowalit. Influence of Sc modification on the fluidity of an A356 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, 487, s. 453 - 457. ISSN 0925-8388.
- [12] HERMAN, Aleš. Metalurgie neželezných slitin. In: [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/Metalurgie%20slitin%20ne%C5%BEElezn%C3%BDch%20kov%C5%AF.pdf>
- [13] *Příručka o hliníku*. 1. vyd. Editor Vladimír Komárek. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969, 707 s., obr. příl. Řada strojírenské literatury.
- [14] LANIK - Typy filtrů a jejich použití. [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.lanik.eu/typy-filtru-a-jejich-pouziti/>

- [15] Podklady ČVUT Praha, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/?udaj=predmet&id=C31017>
- [16] WEISS, Viktorie. Vliv různých forem k odlévání na vybrané vlastnosti experimentální slitiny AlZn5,5Mg2,5Cu1,5. *Slévárnství: Strojírenská technologie*. 2012, 5-6, s. 4.
- [17] CAIS, Jaromír, Jaroslava SVOBODOVÁ a Nataša NÁPRSTKOVÁ. Modifikace slitiny AlSi7Mg0,3 stronciem. s. 9.
- [18] Interní podklady firmy Beneš a Lát, a.s.
- [19] DOLEŽAL, Jaroslav. *Metalurgické procesy v tlakových slévárnách*. Praha, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Praze.
- [20] ROUČKA, Jaromír. 3. *Holečkova konference: redukce nákladů v období ekonomické a finanční krize, technologie, metalurgie, metalurgická kvalita a metalografie slitin neželezných kovů : rozšířené zasedání, zaměřeno na praktické poznatky : 16. a 17. dubna 2009* [online]. Vyd. 1. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009, 77 s.[cit. 2015-04-03]. ISBN 978-80-02-02148-3. Dostupné z: [http://www.rgu.cz/download/holecek2009/00\\_sbornik.pdf](http://www.rgu.cz/download/holecek2009/00_sbornik.pdf)
- [21] KANIA, Patrik. INFRAČERVENÁ SPEKTROMETRIE. [online]. s. 41 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:[http://old.vscht.cz/anl/lach1/7\\_IC.pdf](http://old.vscht.cz/anl/lach1/7_IC.pdf)
- [22] PEŠEK, Jakub. *Studium vlivu metalurgických a technologických parametrů na mechanické vlastnosti slitin hliníku*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.
- [23] OES PolySpek - Jiskrové optické emisní spektrometry a laboratorní spektrometry. [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.jiskrove-spektrometry.cz/oes-polyspek.html>
- [24] Bäckerund - L., Chai, G. - Tamminen, J.: *Solidification Characteristics of Aluminum Alloys*, díl 2, AFS / Skalaluminium, Stockholm, 1990.
- [25] HORÁČEK, Josef a Jiří MORÁVEK. Sledování vlastností slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů: Sledování zabíhavosti slitin hliníku. *Časopis Slévárnství*. roč. 2012, 5-6, s. 1-5.
- [26] PETŘÍK, Josef a Tomáš TOMPOŠ. Spôsobilosť skúšky zabíhavosti horizontálnou metódou: Capability of the horizontal fluidity test. *Slévárnství*. 3-4. Brno: Svaz sléváren ČR, 2010, LVIII.: 5. ISSN 0037-6825.
- [27] LUŇÁK, Milan. *Modifikace eutektických silumínů*. Praha, 2009. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [28] E. GRUZLESKI, John a Bernard M. CLOSSET. AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, INC. *The treatment of liquid Aluminium-Silicon Alloys*. 263 s.