

# Skúsenosti z oblasti modifikácie silumínov

Grzinčič, M. <sup>1)</sup>, Djurdjevič, M. <sup>2)</sup>, Dirnberger, F. <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Nemak Slovakia s.r.o., Ladomerská Vieska 394, 96 501 Žiar n.H., SR, [marko.grzincic@nemak.com](mailto:marko.grzincic@nemak.com)

<sup>2)</sup> Nemak Europe, Frankfurt Airport Center 1, Building A, Level 7, Hugo-Eckener-Ring, 60549 Frankfurt / Main, Nemecko, [mile.djurdejvic@nemak.com](mailto:mile.djurdejvic@nemak.com)

<sup>3)</sup> Nemak Linz, Zeppelinstraße 24, 4030 Linz, Rakúsko, [florian.dirnberger@nemak.com](mailto:florian.dirnberger@nemak.com)

## Abstrakt

*Termickou analýzou bola skúmaná účinnosť stroncia, do 300 ppm, na krivky tuhnutia hliníkovej zliatiny AlSi8Cu3. Zároveň bol analyzovaný vplyv Sr na stupeň modifikácie.*

*Experimentálne výsledky ukázali, že množstvo Sr približne 100 ppm je dostatočné na realizáciu modifikácie eutektika ako i, že termickou analýzou je možné získať informácie o kvalite taveniny tejto zliatiny.*

## Kľúčové slová:

A380, AlSi8Cu3, eutektikum, hliníková zliatina, krivka tuhnutia, metalurgia, mikroštruktúra, modifikácia, modifikátor, morfológia kremika, silumín, stroncium, termická analýza

## 1. Úvod

Za účelom zníženia hmotnosti dielov spaľovacieho motora, zvýšenia ich účinnosti a zníženia spotreby paliva ako aj emisií výfukových plynov, tak automobilový priemysel nahradil aplikáciu zliatin železa s hliníkovými zliatinami. Hliníkové zliatiny sú charakterizované svojou nízkou hustotou, nízkou hmotnosťou, relatívnymi nízkymi teplotami tavenia, zanedbateľnou rozpustnosťou plynov (s výnimkou vodíka), výbornou zlievateľnosťou, dobrou odolnosťou voči korózii, elektrickou a tepelnou vodivosťou a dobrou obrábateľnosťou. Hlavné legujúce prvky kremík, meď a horčík sú primárne zodpovedné za charakter mikroštruktúry danej hliníkovej zliatiny. Kremík sa pridáva na zlepšenie zlievateľnosti, tekutosti, ako aj na zníženie sklonu k tvorbe stiahnutí a získania potrebných mechanických vlastností. Meď zvyšuje pevnostné vlastnosti na úkor čiastočnej redukcie plastických vlastností a odolnosti voči korózii. Horčík v kombinácii s meďou zvyšuje efekt vytvrdzovania hliníkových zliatin. Všetky uvedené legujúce prvky majú významný vplyv na krivku tuhnutia konkrétnych hliníkových zliatin. Podľa [1] kryštalizáciu zliatiny AlSi8Cu3 možno popísať nasledovne:

- Primárna  $\alpha$ -hliníková dendritická sieť sa tvorí v rozmedzí 590 – 595°C. Presná teplota závisí hlavne od množstva Si a Cu v zliatine. Toto vedie k nárastu koncentrácie Si a Cu vo zvyšnej tavenine.
- V rozmedzí 560 – 565°C sa vytvára eutektická zmes Si +  $\alpha$ , čo vedie k ďalšiemu lokalizovanému nárastu obsahu Cu vo zvyšnej tavenine.
- Približne pri 550°C sa začína precipitácia fáz Mg<sub>2</sub>Si a Al<sub>8</sub>Mg<sub>3</sub>FeSi<sub>6</sub>.
- Zhruba pri 505°C sa vytvára jemná eutektická fáza bohatá na meď. V závislosti od množstva medi a stroncia, sa objaví fáza bohatá na meď zvyčajne v troch formách, ako masívna alebo objemná fáza Al<sub>2</sub>Cu, ako eutektická Al-Al<sub>2</sub>Cu alebo ak tavenina obsahuje viac než 0,5 hmotnostného percenta Mg, tak potom ako najjemnejšia eutektická fáza Al<sub>5</sub>Mg<sub>8</sub>Cu<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>.
- Teplota solidu sa zvyčajne pohybuje pod 500 °C. Táto teplota je výrazne nižšia pri sekundárnych zliatinách AlSi8Cu3s kvôli väčšiemu množstvu stopových prvkov prítomných v tejto zliatine.

Okrem hlavných legujúcich prvkov, ktoré majú podstatný vplyv na krivku tuhnutia týchto zliatin, sú tam tiež niektoré minoritné prvky, ktoré výrazne menia ich krivku tuhnutia [2-9]. Stroncium je jedným z nich, účelovo pridaný do hliníkovej taveniny za účelom zmeny morfológie eutektickej zmesi Al-Si [10-13].

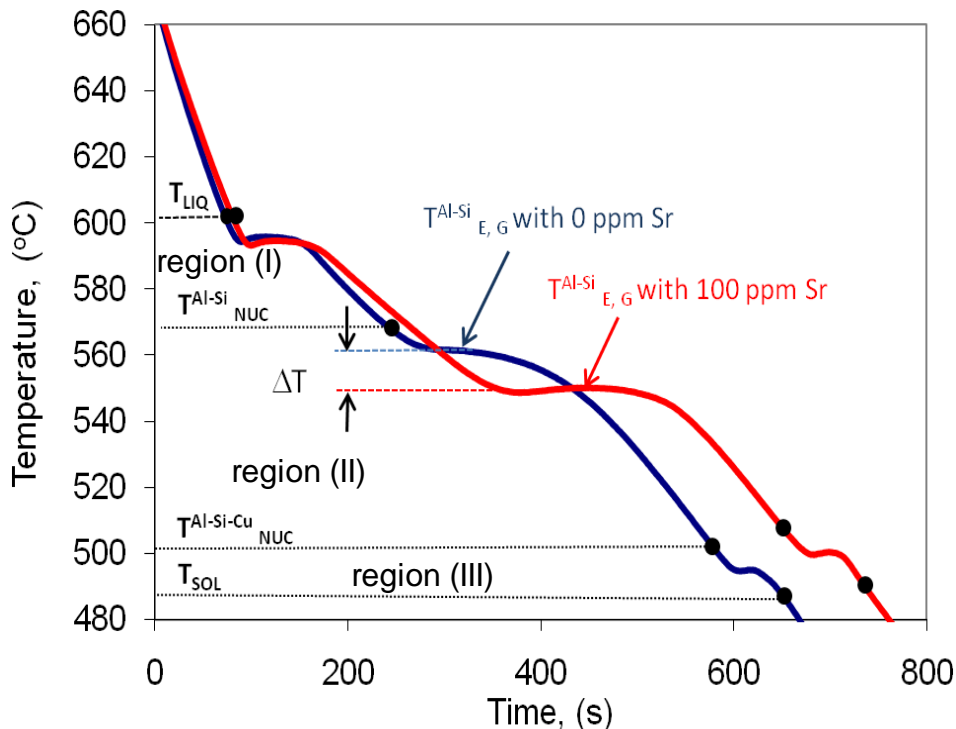
Aby sa zaručilo, že odlievané komponenty vyrábané s použitím hliníkových zliatin budú mať dobré mechanické vlastnosti, tak sa ich odlievané mikroštruktúry musia podrobne sledovať, či monitorovať. V zlievarenstve hliníka bola uvedená aplikácia termickej analýzy (TA) v publikáciách Cibulu [2] a Mondolfa [3]. TA krivky chladnutia alebo presnejšie jej prvej derivácie sa úspešne aplikujú na získanie informácií o účinku **modifikátorov** a očkovačov v hliníkových taveninách [11]. U binárnych zliatin s prítomnosťou či už modifikátorov, alebo očkovačov je možné spresniť príslušný diagram. TA umožňuje zistiť aj podiel jednotlivých štruktúrnych zložiek. Metóda TA výhodná aj z ekonomického hľadiska, je jednoduchá a poskytuje exaktné výsledky.

## 2. Modifikácia zliatin Al-Si-Cu

Pod termínom „modifikácia“ sa rozumie zmena veľkosti a morfológie kremíka pomocou modifikátora (Na, K, Rb, Ce, Ca, Sr, Ba, La, Yt). Z priestorového pohľadu spočíva v zmene dostičkovej morfológie kremíka na tyčinkovitú. Z rovinného hľadiska ide o zmenu ihlíc na globulitické častice. Zmenou morfológie, v dôsledku modifikácie, sa výrazne zlepšujú plastické vlastnosti materiálu. Bolo zistené, že aj pridaním niektorých ďalších legujúcich prvkov do taveniny vzniká jemná ihlicovitá štruktúra. K nim patrí arzén, antimón, selén alebo kadmium. Zo všetkých uvedených prvkov, sodík, stroncium a antimón sú, z hľadiska modifikácie, najúčinnnejšie. Modifikátory ako je sodík, antimón a stroncium v podeutektických zliatinách kremíka (s nižším obsahom ako približne 12% kremíka) majú tendenciu znižovať medzifázové pnutie medzi eutektickými fázami [4, 5, 10, 12, 13]. Redukcia medzifázového pnutia zvyšuje uhol kontaktu medzi hliníkom a kremíkom, čím sa umožní, že hliník bude obalovať a týmto aj blokovať rast kremíka.

Optický emisný spektroskop (OES) udáva množstvo stroncia v hmotnostných percentách, avšak neposkytuje informácie o morfologických zmenách kremíka. Je známe, že stroncium po istom čase reaguje s ostatnými prvkami v tavenine a tak stráca svoju schopnosť ako modifikátor, t.j. stáva sa neaktívny [14]. Preto OES nemôže odhadnúť množstvo aktívneho stroncia, t.j. stroncia, ktoré má potenciál modifikovať kremík.

Alternatívnou metódou stanovenia príslušnej činnosti modifikátora je stanovenie  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_{E,G}^{Al-Si}_{E,G, bez Sr} - T_{E,G}^{Al-Si}_{E,G, so Sr}$ ) prostredníctvom termickej analýzy [5-11]. Vyššie  $\Delta T$  predstavuje väčšie množstvo aktívneho modifikátora v tavenine. Účinok prísad modifikátorov na krivke tuhnutia zliatin Al-Si-Cu je sledovateľný nárastom teplôt hlavnej eutektickej reakcie. Obrázok 1, zobrazuje účinok modifikácie (rôzny obsah stroncia) na krivkách tuhnutia.



**Obrázok 1.** Krivka tuhnutia termickej analýzy zliatiny AlSi6Cu4 pre nulovú (0ppm) a vyššiu (100 ppm) hladinu stroncia.

Pokles  $\Delta T$  koreloval so stupňom Al-Si eutektickej modifikácie a analyticky bol vyjadrený rovnicou (1).

$$\Delta T = T_{E,G, bez Sr}^{Al-Si} - T_{E,G, so Sr}^{Al-Si} \quad (1)$$

kde:

$T_{E,G, bez Sr}^{Al-Si}$  - Al Si eutektická teplota nemodifikovanej zliatiny je maximálna (plató-) teplota.

$T_{E,G, so Sr}^{Al-Si}$  - AlSi eutektická teplota po pridaní modifikátorov (zvyčajne Al-10%Sr), ktorá sa dosahuje počas teploty tvorenia zrn.

$\Delta T$  - Teplotný rozdiel medzi nemodifikovanou (bez Sr) a modifikovanou (so Sr) Al-Si eutektickou teplotou.

Hlavným cieľom práce bolo vyhodnotiť vplyv prídavkov stroncia na charakteristické teploty tuhnutia komerčnej zliatiny AlSi8Cu3 a zistiť jeho optimálny obsah pre zloženie danej zliatiny.

### 3. Experimentálne postupy

V týchto experimentoch sa využili komerčné ingoty zo zliatiny AlSi8Cu3 (označenie A 380, VDS 226). Chemické zloženie stanovené pomocou OES, je uvedené v Tabuľke 1. Prídavky stroncia sa pohybovali medzi 0 a 300 ppm, (50; 100; 150; 200; 250 a 300 ppm).

**Tabuľka 1.** Chemické zloženie skúmanej zliatiny.

Prvok	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Pb	Sn	Ti	P
hm. %	8.5	0.25	2.5	0.11	0.26	0.1	0.1	0.02	0.02	0.12	0.0015

Desať kilogramov sa roztavilo v elektrickej odporovej peci a udržiavalo sa pri teplote  $720 \pm 5^\circ\text{C}$ , v ochrannej atmosfére dusíka. Tavenina bola potom modifikovaná pridaním hlavnej zliatiny (Al-10 hm. % stroncium). Bola dodržaná inkubačná doba 15 minút po pridaní stroncia pred odobratím testovacej vzorky TA. Testovacie vzorky TA boli odobraté naliatím hliníkovej taveniny do valcovitého oceľového pohára (50 mm v priemere, 60 mm hlboký). Testovací pohár tejto TA bol predhriaty na  $300^\circ\text{C}$  po dobu 10 minút. Priemerná hmotnosť testovacej vzorky TA bola  $300 \pm 10$  gramov. Údaje TA boli zozbierané s použitím systému pre získavanie údajov, ktorý bol prepojený na osobný počítač. Teploty medzi  $700 - 400^\circ\text{C}$  boli zaznamenané pre všetky experimenty. Za účelom preštudovania účinku rôzneho obsahu stroncia na charakteristické teploty stuhnutia zliatiny AlSi8Cu3, boli zobrať dve vzorky pre každý analyzovaný prídavok Sr do taveniny.

Vzorky pre štruktúrnú analýzu boli odrezané z testovacej vzorky v blízkosti koncov termočlánkov. Prierezy vzoriek boli obrúsené a vyleštené na automatickej leštičke s použitím štandardných metalografických postupov. Finálne leštenie bolo vykonané s použitím komerčnej suspenzie (Struers OP-U). Vzorky (30mm x 30mm) boli pozorované pod svetelným optickým mikroskopom, pri ktorom sa využilo zväčšenie 500x.

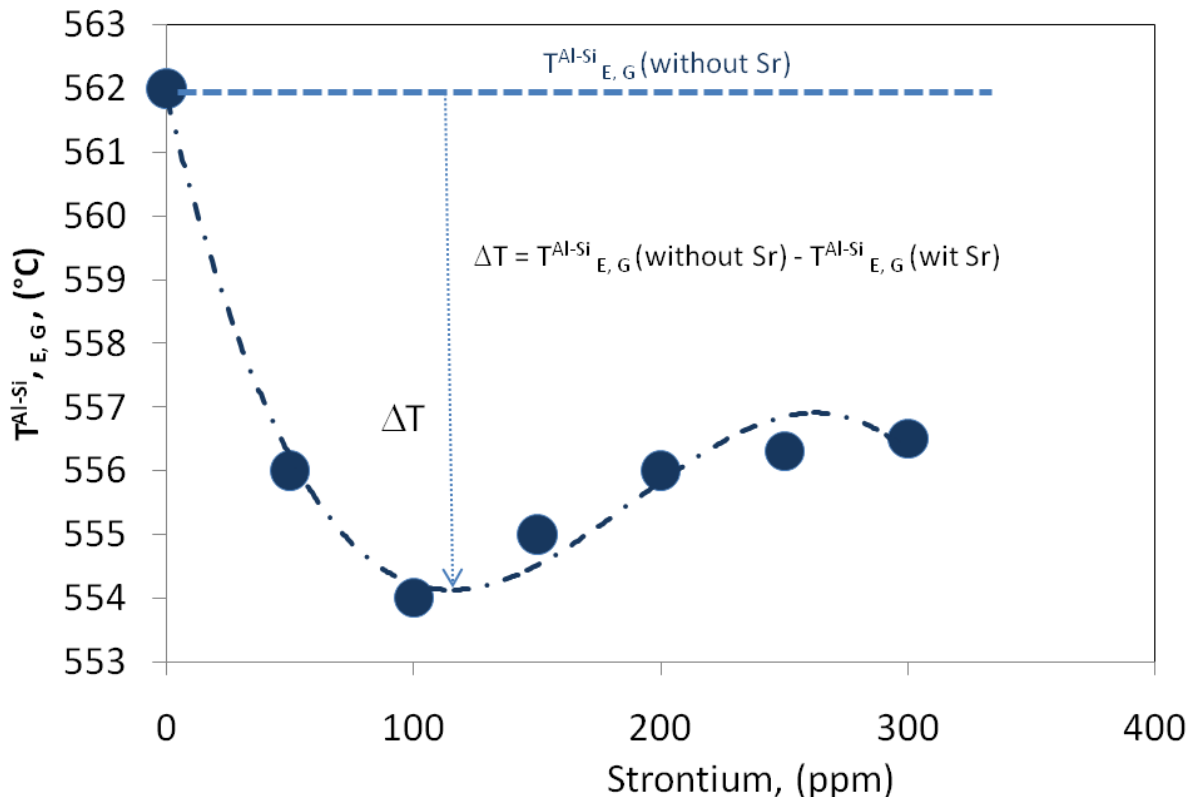
### 4. Výsledky a diskusia

Krivka tuhnutia sa môže opísať ako „odtlačok prsta“ procesu tuhnutia. Hlavné a vedľajšie metalurgické reakcie (ktoré sú termodynamicky dostatočne silné čo sa týka vývoja skupenského tepla) sú prejavované na krivke tuhnutia prostredníctvom inflexných bodov a zmeny sklonu. Na základe zavŕšenia procesu tuhnutia môže byť vyjadrená štruktúra testovacej vzorky a jej vlastnosti z týchto reakcií.

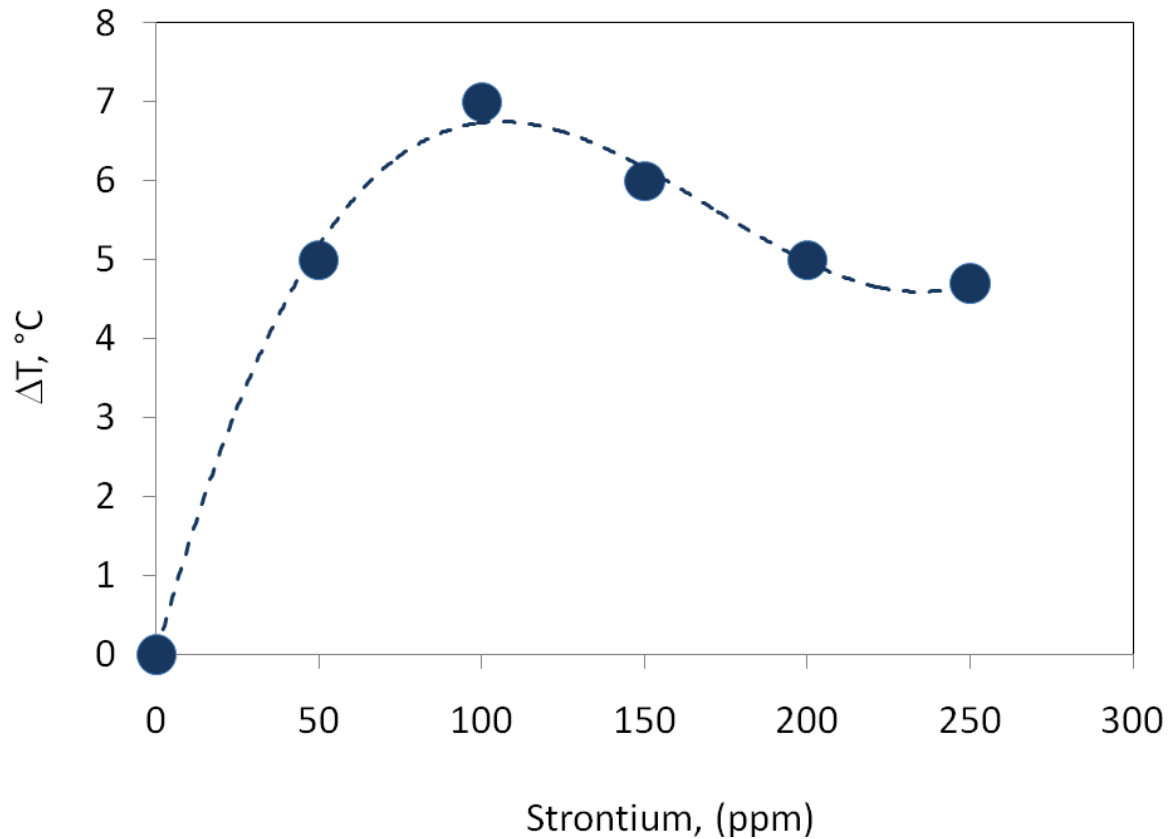
#### 4.1 Výsledky získané s použitím techniky termickej analýzy

Už bolo spomenuté, že stroncium ovplyvňuje morfológiu kremíka [1-8]. Neexistuje v literatúre žiadny konsenzus ohľadne úrovne stroncia požadovaného na dosiahnutie potrebného stupňa eutektickej modifikácie kremíka v zliatine Al-Si-Cu. Boli použité množstvá od 50 do 300ppm v každodennej rutine v mnohých hliníkových zlievárenských závodoch. Tento široký rozsah môže byť prisúdený zmene v chemickom zložení taveniny, metódam opracovania a rýchlostiam tuhnutia. Taktiež boli použité rôzne analytické a testovacie techniky (TA s jednou alebo dvomi termočlánkami, diferenciálne TA alebo diferenciálna skenovacia kalorimetria) na vyčíslenie procesu tuhnutia a jeho účinkov na morfológiu kremíka. Preto sme vykonali sériu experimentov na optimalizáciu potrebného množstva prídavkov stroncia do taveniny Al-Si8-Cu3. Vo všetkých experimentoch bola dodržaná konštantná rýchlosť tuhnutia ako aj chemické zloženie hlavných legujúcich prvkov. Vplyvy vedľajších legujúcich prvkov boli vylúčené prostredníctvom návrhu syntetickej zliatiny s veľmi nízkym obsahom vedľajších prvkov (prosím, vid' Tabuľka 1). Obrázok 1 zobrazuje dve krivky tuhnutia TA s podobnou priemernou rýchlosťou tuhnutia približne  $0,15 \text{ }^\circ\text{C s}^{-1}$ , získanou pre taveniny s príslušným obsahom 0 a 100 ppm stroncia. Bola zmeraná rýchlosť tuhnutia vzorky TA z krivky tuhnutia (t.j. rozsah tuhnutia medzi teplotami kvapalných telies a pevných telies:  $(T_{\text{LIQ}} - T_{\text{SOL}})$  bola rozdelená celkovým časom tuhnutia:  $(t_{\text{LIQ}} - t_{\text{SOL}})$ ).

Na obidvoch krivkách je možné sledovať tri osobitné oblasti: (I) **primárna oblasť tuhnutia** (časť krivky chladenia medzi teplotami kvapalnej látky a Al-Si eutektickej teploty tvorby jadier); (II) oblasť, v ktorej **tuhne eutektikum Al-Si** (charakterizované prvou rovinou na krivkách chladenia vyhradenou medzi teplotami Al-Si a Al-Si-Cu tvorby jadier); a (III) oblasť, kde sa uskutočňuje **formácia fázy bohatej na med'** (posledná rovina obmedzená eutektickou teplotou Al-Si-Cu tvorby zŕn a teplotou pevného telesa). Ako to zobrazuje Obrázok 1, v oblasti primárneho tuhnutia obidve zliatiny dokonca s výrazne odlišným obsahom stroncia uvoľňujú to isté množstvo tepla a majú identickú dráhu tuhnutia. Všetky charakteristické teploty z tejto oblasti (Al-Si teplota tvorby zŕn, Al-Si teplota podchladenia, Al-Si teplota nárastu a teplota dendritickej spojitosti) majú tie isté teploty nezávislé od množstva pridaného stroncia do hliníkovej taveniny. Dosiahnutím eutektickej oblasti Al-Si približne  $562^\circ\text{C}$ , zliatina s vyšším obsahom stroncia posunula vylučovanie primárnej  $\alpha$ -Al fázy k nižšej teplote (dosahujúc minimum približne pri  $554^\circ\text{C}$ ) v porovnaní so zliatinou s obsahom stroncia 0 ppm (Al-Si eutektická teplota je  $562^\circ\text{C}$ ).



**Obrázok 2a.** Vplyv rôzneho množstva stroncia na teplotu  $T^{\text{Al-Si}}_{\text{E,G}}$

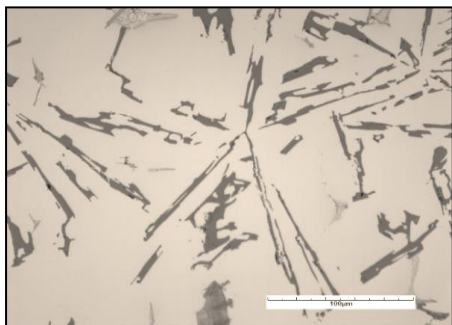


**Obrázok 2b.** Vplyv rôzneho množstva stroncia na teplotu  $\Delta T$ .

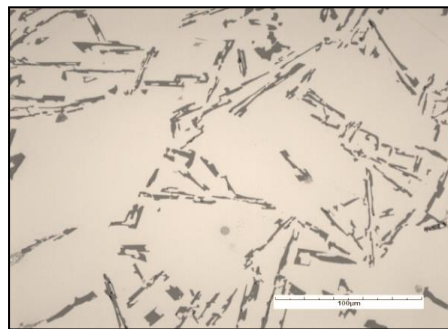
Obrázky 2a a 2b jasne zobrazujú, že pridanie stroncia zníži eutektickú teplotu nárastu hliníka - kremíka,  $T_{E, G}^{Al-Si}$ , (rovina na krivke tuhnutia). Keď sa úroveň stroncia zvýši z 1 na 300 ppm, teplota  $T_{E, G}^{Al-Si}$  sa zníži z  $562^{\circ}C$  na  $554^{\circ}C$ . Maximálne zvýšenie  $\Delta T$  pri  $8^{\circ}C$  bolo dosiahnuté pri úrovni stroncia približne 100 ppm.

#### 4.2 Výsledky analýzy

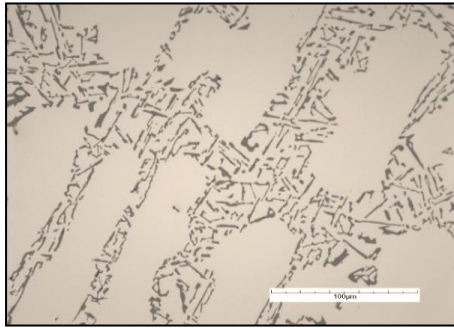
Zmeny tvaru kremíka, ktoré sa objavujú so zvýšeným obsahom stroncia sú zobrazené na Obrázkoch 3 (a až f). Bola zistená prítomnosť intermetalických fáz s obsahom Fe a Cu (viď Obrázok 3 a).



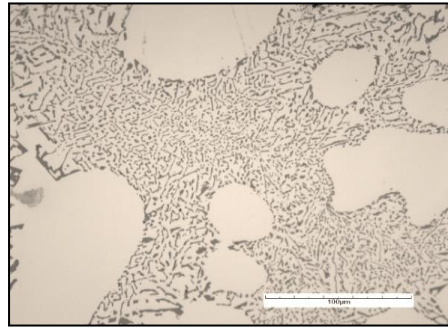
a) Úplne nemodifikovaná mikroštruktúra (0ppm Sr)



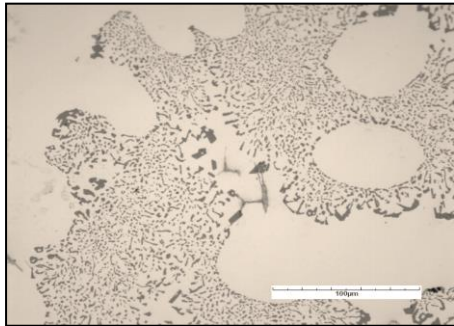
b) Nemodifikovaná mikroštruktúra (50ppm Sr)



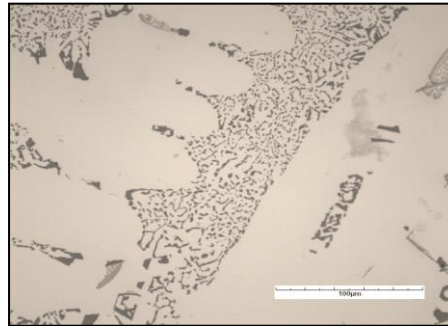
c) Modifikovaná mikroštruktúra (100ppm Sr)



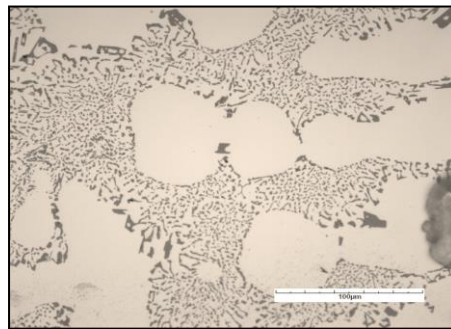
d) Modifikovaná mikroštruktúra (150ppm Sr)



e) Modifikovaná mikroštruktúra (200ppm Sr)



f) Veľmi jemná mikroštruktúra (250ppm Sr)



g) Veľmi jemná mikroštruktúra (300ppm Sr)

**Obrázok 3.** Snímky svetelnej optickej mikroskopie eutektickej morfológie hliníka–kremíka ako funkcia úrovne stroncia (od 0 do 300ppm Sr), zväčšenie 500x).

Údaje získané z TA, uvedené na Obrázkoch 1 a 2, ako aj mikroštruktúrna analýza uvedená na Obrázku 3 (a - g), prezentujú, že pridanie stroncia znižuje eutektickú teplotu nárastu hliníka – kremíka ( $T^{Al-Si}_{E,G}$ ) a mení stupeň modifikácie kremíka. Keď porovnáme výsledky uvedené na Obrázkoch 2a a 2b s mikroštruktúrou kremíka uvedenou na Obrázku 3(a - g), stáva sa evidentným vzťah medzi poklesom eutektickej teploty nárastu hliníka – kremíka ( $T^{Al-Si}_{E,G}$ ) a stupňom modifikácie kremíka: čím vyššia je  $\Delta T$ , tým vyšší je stupeň modifikácie.

## 5. Technika termickej analýzy ako kontrolný nástroj kvality taveniny

Konštruktéri, respektíve zákazníci predpisujú vo výkresoch a príslušných dokumentoch modifikáciu hliníkovej zliatiny a udávajú rozpätie chemického zloženia pre stroncium, obvykle 80 až 300 ppm. Zlievareň má totiž dovolené veľmi široké pásmo obsahu stroncia a vystavuje sa nebezpečenstvu vzniku vnútorných chýb –

stiahnutí a mikroostiahnutí pri vyšších obsahoch stroncia. Dokonca prítomnosť priemyselných zariadení na TA je stále v mnohých zlievarňach i renomovaných výrobcov odliatkov neštandardná!

Kompletné chápanie kvality taveniny má najvyššiu dôležitosť pre kontrolu a predvídanie aktuálnych charakteristík odlievania. Ak môžu prevádzkoví inžinieri konať viac proaktívnym ako reaktívnym spôsobom s ohľadom na taveninu a kontrolu kvality odlievania, dokážu znížiť náklady za prestoje a zvýšiť úroveň kvality výrobkov. TA môže poskytnúť takéto možnosti a preto má dôležité výhody oproti svojim post procesným náprotivkom, ktoré sú často deštruktívne vo svojej podstate.

## 6. Závery

TA sa môže použiť na vyhodnotenie nasledujúcich parametrov: veľkosti zrn, veľkosti dendritických buniek, úrovne eutektickej modifikácie Al-Si, podiel jednotlivých štruktúrnych zložiek (fraction solid), dendritickej koherenčnej teploty ako aj charakteristických teplôt rôznych metalurgických reakcií medzi kvapalnou a tuhou fázou. Použitím moderných experimentálnych zariadení a počítačovým spracovaním získaných údajov sa TA stáva vynikajúcou metódou pre kontrolu kvality procesu odlievania. TA môže poskytnúť prevádzkovým inžinierom schopnosť konať proaktívnym spôsobom s ohľadom na taveninu a kvalitu odlievania.

V prezentovanej práci sa vykonali experimenty na získanie informácií o účinku obsahov stroncia s množstvami od 0 po 300ppm na mikroštruktúru hliníkovo kremíkovej eutektickej fázy v zliatine AlSi8Cu3. Metódou  $\Delta T$  bolo zistené, že obsah stroncia okolo 100ppm je dostatočný na modifikovanie kremíkových častíc v tejto zliatine pri daných experimentálnych podmienkach. Zistili sme, že pri množstve stroncia nad 130 ppm, v závislosti od lokálnych podmienok tuhnutia odliatku, dochádza k vzniku zlievarenských chýb.

## 7. Literatúra

- [1] Bäckerud, L., Chai, G., Tamminen, J. Solidification Characteristics of Aluminum alloys. Volume 2. /Charakteristiky tuhnutia hliníkových zliatin. Diel 2./ AFS-SKANALUMINIUM, 1986, s. 95-105.
- [2] Cibula, A. The Mechanism of Grain Refinement of Sand Castings in Aluminum Alloys. /Mechanismus očkovania hliníkových zliatin odlievaných do piesku/ J.Ins. Metals, 1949/50, roč. 76, č. 312.
- [3] Crossley, P. B., Mondolfo, L. F. The Modification of Aluminum Silicon Alloys. /Modifikácia hliníkovo kremičitých zliatin Modern Casting/ Moderné odlievanie, 1966, roč. 49, č. 53/64.
- [4] Sigworth, G. K. Theoretical and Practical Aspect of the Modification of Al-Si Alloys. /Teoretický a praktický aspekt modifikácie zliatin Al-Si/ AFS Transaction, 1983, roč. 66, s. 7-16.
- [5] Wang, L., Shivkumar, S. Strontium Modification of Aluminum Alloy Casting in the Expendable Pattern Casting Process. /Modifikácia hliníkovej zliatiny stronciom v procese odlievania spotrebiteľského vzoru/ Journal of Material Science, 1995, roč. 30, s. 1584-1594.
- [6] Garat, M., Laslaz, G., Jacob, S., Meyer, P. State of the Art Use of Sb, Na and Sr Modified Al-Si Casting Alloys. /Stav techniky využitia Sb, Na a Sr modifikovaných zliatin Al-Si/ AFS Transaction, 1992, roč. 146, s. 821-832.
- [7] Apelian, D., Sigworth, G. K., Wahler, K. R. Assessment of Grain Refinement and Modification of Al-Si Foundry Alloys by Thermal Analysis. /Posúdenie očkovania a modifikácie Al-Si zliatin termickou analýzou/ AFS Transaction, 1984, roč. 161, s. 297-307.
- [8] Doty, H. W., Samuel, A. M., Samuel F. H. Factors Controlling the Type and Morphology of Copper-Containing Phases in the 319 Aluminum Alloy. /Faktory riadiace typ a morfológiu fázy obsahujúcej meď v hliníkovej zliatine 319/ 100<sup>th</sup> AFS Casting Congress. USA, 1996.
- [9] Samuel, A. M., Samuel, F. H. A Metallographic Study of Porosity and Fracture Behavior in Relation to the Tensile Properties in the 319.2 Chill Casting. /Metalografická štúdia pórovitosti a správania sa lomu vo vzťahu s ťahovými vlastnosťami v 319.2, odlievanie do kokíl/ Metallurgical and Material Transaction, 1995, roč. 26A, s. 2359-2372.
- [10] Beumler, H., Hammerstad, A., Wieting, B., DasGupta, R. Analysis of Modified 319 Aluminum Alloy. /Analýza modifikovanej hliníkovej zliatiny 319/ AFS Transaction, 1988, roč. 54, s. 1-12.
- [11] Mulazimoglu, M., Tenekedjev, N., Glosset, B., Gruzleski, J. Microstructures and Thermal Analysis of Strontium Treated Al-Si Alloys. /Mikroštruktúry a termická analýza Al-Si zliatin upravovaných stronciom/ AFS Transaction, 1995, s. 23-40.

- [12]Argyropoulos, S., Glosset, B., Gruzleski, J., Oger, H. The Quantitative Control of Modification in Al-Si Foundry Alloys Using a Thermal Analysis Technique. /Kvantitatívne riadenie modifikácie v predzliatinách Al-Si s použitím techniky termickej analýzy/ *AFS Transaction*, 1983, roč. 27, s. 351-358.
- [13]Djurdjevič, M., Stockwell, T., Sokolowski, J. H. The Effect of Strontium on the Microstructure of Aluminum-Silicon and Aluminum-Copper Eutectics in the 319 Alloy. /Účinok stroncia na mikroštruktúru hliníkovo – kremičitých a hliníkovo – medených eutektík v zliatine 319/ *International Journal of Cast Metals Research*, 1999, roč. 12, s. 67-73.
- [14] Djurdjevič, M., Gallo, P., Jiang, H., Sokolowski, J. H. Evaluation of Strontium Fading in the 319 Aluminum Alloy Using Thermal Analysis. /Vyhodnotenie slabnutia účinku stroncia v hliníkovej zliatine 319 s použitím termickej analýzy/ *AFS Transaction*, 2000, roč. 20, s. 485-489.
- [15] Castro-Roman, M, Montes-Rodriguez, J. J., Herrera Trejo, M. Strontium Effect on the Solidification Path of a 319 Type of Aluminum Alloy. /Účinok stroncia na dráhu krivky tuhnutia hliníkovej zliatiny typu 319/ *World Foundry Congress*. UK, 2006, s. 1 – 10.