



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
3515 MISKOLC Egyetemváros



Hengerfej öntvények gyártásánál alkalmazott Sr-tartalom optimális mennyiségének vizsgálata

Készítette:

Tengely István MAK-IV

Konzulensek:

Dr. Dúl Jenő, egyetemi docens

Dr. Fegyverneki György, c. egyetemi docens

2011

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	1
1. NEMESÍTÉS.....	2
1.2 Hipoeutektikus és eutektikus összetételű alumínium-szilícium ötvözetek tartós nemesítése stronciummal.....	5
<i>1.2.1 Stronciumos nemesítés összehasonlítása más nemesítésekkel</i>	<i>6</i>
<i>1.2.2 A stroncium hatása a hidrogén-oldhatóságra.....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.3 A Sr-mal való módosítás hatása a pórusok gócképződésére.....</i>	<i>9</i>
2. AZ EUTEKTIKUS Si NEMESÍTETTSÉGÉNEK VIZSGÁLATI MÓDSZEREI	11
2.1 Töretpróba	11
2.2 Csiszolatpróba	12
2.3 Szakítópróba	14
2.4 Spektrométeres elemzés	15
2.5 Elektromos vezetőképesség mérés	16
2.6 Termikus analízis	17
<i>2.6.1. Termikus analízis során kapott lehűlési görbe.....</i>	<i>17</i>
<i>2.6.3 Termikus analízis során kapott hőmérséklet-idő görbe jellegzetes pontjai</i>	<i>18</i>
<i>2.6.4 A termikus analízis segítségével való ellenőrzés gyakorlata</i>	<i>19</i>
3. SAJÁT KÍSÉRLETEK	20
3.1 Célkitűzés	20
3.2 Kísérleti körülmények.....	20
3.3 A kísérleteknél alkalmazott vizsgálati módszerek.....	22
<i>3.3.1 Sűrűségindex-vizsgálat.....</i>	<i>22</i>
<i>3.3.2 Termikus analízis.....</i>	<i>22</i>
3.4 A Stroncium hatása az AlSi9Cu1 olvadék tulajdonságaira	24
<i>3.4.1 Az oldott gáztartalom vizsgálata</i>	<i>24</i>
<i>3.4.2 Termikus elemzés eredményeinek kiértékelése.....</i>	<i>25</i>
3.5 A Stroncium hatása az AlSi9Cu3 olvadék tulajdonságaira	27
<i>3.5.1 Az oldott gáztartalom vizsgálata</i>	<i>27</i>
<i>3.5.2 Termikus elemzés eredményeinek kiértékelése.....</i>	<i>28</i>
4. ÖSSZEGZÉS	30
5. FELHASZNÁLT IRODALOM	31

BEVEZETÉS

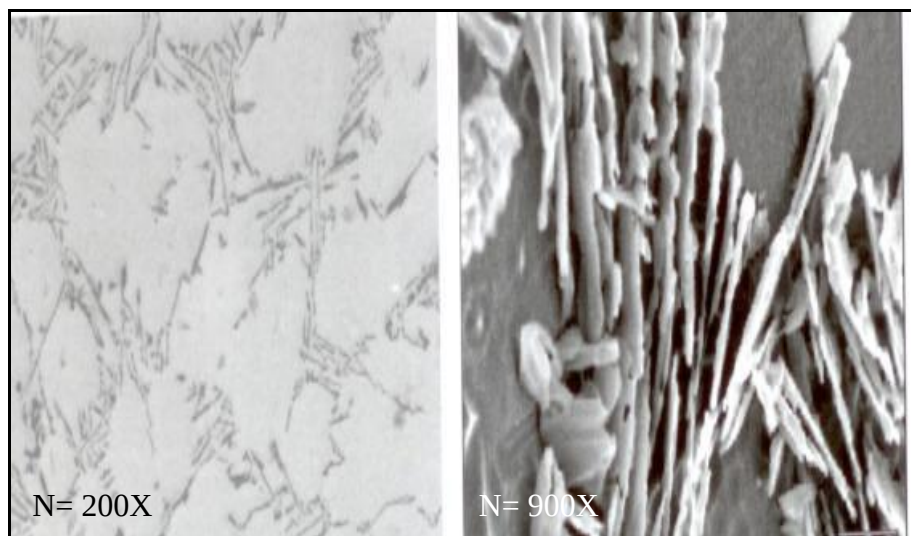
Az öntészeti alumínium ötvözetek jelentős részét az Al-Si ötvözetek teszik ki. Felhasználásuk széles körű, azonban legkedveltebbek az autóiparban. Legfőbb előnyük kicsi sűrűségük – a Si $2,3 \text{ g/cm}^3$ -es sűrűségével párosítva az Al $2,7 \text{ g/cm}^3$ –es sűrűséget, a keletkező ötvözet nem veszíti el az alacsony tömeg adta előnyét – es könnyű önthetőségük, melynek köszönhetően bonyolult es komplex alakú, valamint vékonyfalú öntvényeket lehet előállítani. Ahogy nőtt az autóiparban az igény a kisebb tömegű alkatrészek felé, az Al-Si ötvözetből készült termékek elkezdtek kiszorítani a vasból, acélból készült darabokat. Az alkatrészgyártó üzemek megpróbálták a korábban gyártott elemeket könnyebb kivitelben gyártani, ennek a folyamatnak köszönhető többek között az Al-Si ötvözetek térhódítása. Manapság számos alkatrész készül ezekből az ötvözetekből pl.: motorblokk, hengerfej stb.

A járműipari alkatrész-előállítás területén a legtöbb cégnél és öntödénél csúcstechnológiai szintű gyártás folyik. A cégnél személyautókhoz hengerfejek gyártása történik. Az elkészült alkatrésznek nagy terhelést kell elviselnie, ezért fontos, hogy megfelelő szilárdsági és mechanikai tulajdonságokkal rendelkezzenek. Kutatásaim során a stronciumos nemesítés optimális feltételeit vizsgáltam Al-Si ötvözeteknél. Az üzem és a Miskolci Egyetem kutatási együttműködésének egyik aktuális és fontos témája az optimális Sr tartalom meghatározása. A vizsgálatra azért volt szükség, mivel a többlet Sr adagolás problémákat okozhat a kész öntvény megszilárdulása után. Az optimális mennyiségű stroncium adagolása azért fontos, mert megváltoztatja a szilárdulás során kiváló Si szemcsék nagyságát és morfológiáját is. A stroncium adagolásakor azt tapasztaljuk, hogy az lenyomja az eutektikus hőmérsékletet, ami befolyásolja majd a Si eutektikus fázis szerkezetét.

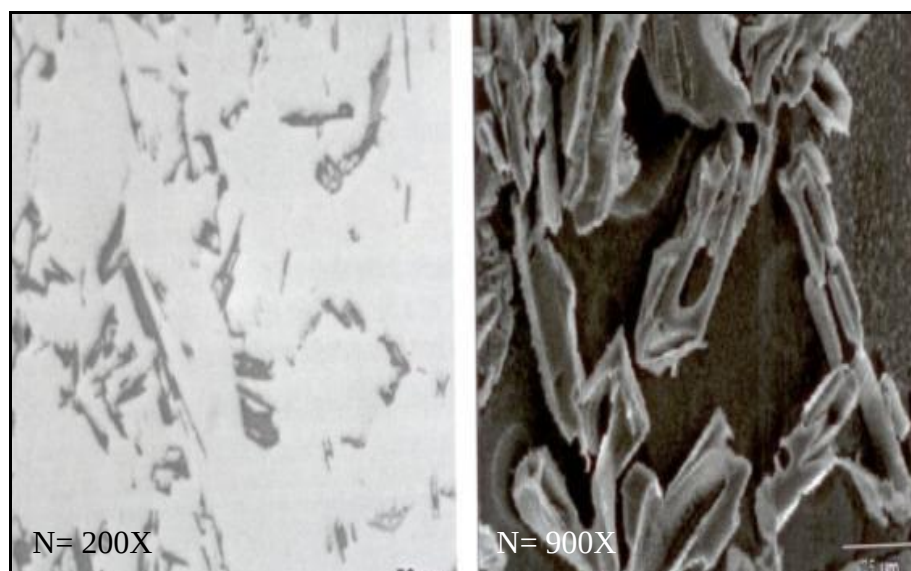
Kísérleteim során különböző mennyiségű stroncium adagolásával végeztem labor körülmények között vizsgálatokat. Mivel a kiértékeléskor azt tapasztaltam, hogy a kapott információk nem szolgáltatnak megfelelő ismeretet, ezért szakítópálcákat is öntöttem, hogy a szilárdsági tulajdonságokat is tudjam majd vizsgálni a későbbiekben.

1. NEMESÍTÉS

Az elmúlt évszázad elején a hipoeutektikus és eutektikus összetételű öntészeti alumínium-szilícium ötvözetből előállított öntvényekkel a gépipar nem tudott mit kezdeni. Ugyanis az ötvözet kristályosodásakor primeren, kisebb-nagyobb méretű poliéderek formájában szilícium kristályok váltak ki, majd az eutektikum kristályosodása során az eutektikum Si fázisa lemezes (1. ábra), vagy szemcsés (2. ábra) morfológiával kristályosodott.



1. ábra: Eutektikus összetételű alumínium-szilícium ötvözet eutektikumának kristályosodásakor kiváló lemezes szilícium [1]



2. ábra: Eutektikus összetételű alumínium-szilícium ötvözet eutektikumának kristályosodásakor kiváló szemcsés szilícium [1]

A primeren kivált szilícium poliéderek jelentős mértékben rontják a megmunkálhatóságot (a nagy keménységű Si poliéderek tönkretették a megmunkáló szerszámok életét), a szívóssági, és a szilárdsági tulajdonságokat.

Az AlSi ötvözet eutektikumának kristályosodásakor kiváló különböző morfológiájú Si fázis nemcsak mikroszkópi képében különbözött egymástól, az ötvözetek öntészeti tulajdonságai is eltérőek voltak. Az AlSi ötvözet eutektikumának kristályosodásakor a Si fázis változó vastagságú lemez ill. tű formában váltak ki, melyek helyenként párhuzamos orientáltsággal, máskor kötegszerű, vagy csillag alakú képződményként fordultak elő [1].

A primer α - alumínium dendrites hálózati formái 580°C és 610 °C között alakulnak ki. A pontos hőmérséklet elsősorban a Si és a Cu koncentrációjától függ. 570°C és 555°C között (az Al-Si eutektikus hőmérséklet) alakulnak ki az Al és a Si formái [2].

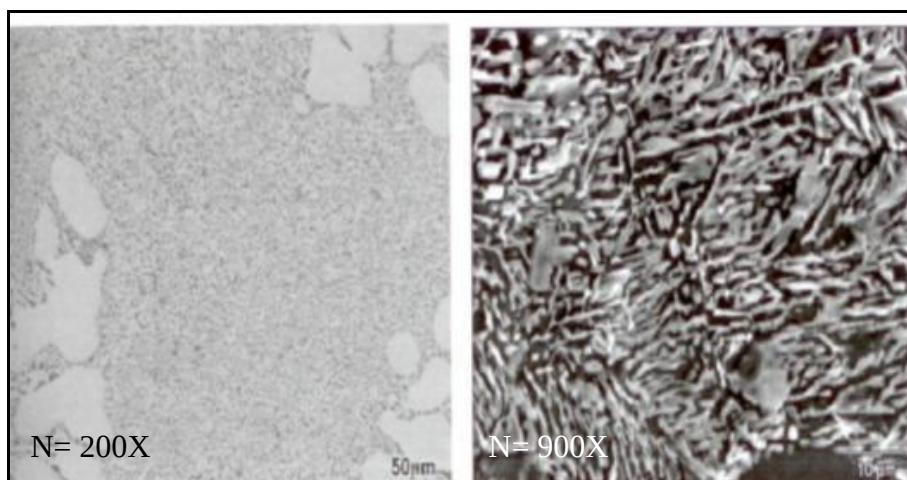
Az AlSi ötvözet eutektikumának kristályosodásakor a szemcsés Si fázis egyenlőtlen élhosszúságú sokszögű, vagy bizarr alakú morfológiával rendelkező képződményként fordultak elő. Ilyen morfológiával kristályosodó Si fázis az eutektikumban, orientáció nélkül helyezkedett el. Időnként az eutektikumban a szemcsés Si fázis mellett, orientáció nélküli lemezes szilícium morfológiával rendelkező Si fázis is előfordult [1].

A gyártók megfigyelték, hogy amikor az eutektikum-kristályosodáskor döntő mértékben szemcsés típusú szilícium fázis jelenik meg, akkor rendre kevesebb probléma volt a kitéplálással, ugyanakkor a kisebb nyúlási értékek miatt kevésbé volt szívós az ötvözet, mint akkor, amikor az ötvözet eutektikumának kristályosodásakor lemezes szilícium fázis vált ki.

Mind a két esetben igaz volt, hogy a szilárdsági értékek az előírtakhoz képest jelentős ingadozást mutatott, és a találati biztonság is erősen szórt. Elődeinknek ezekkel a technológiai problémákkal kellett együtt élni addig, amíg Pacz Aladár szabadalma meg nem jelent. Pacz Aladár szabadalma kiterjedt a gravitációs öntvény és a „Spritzguss” gyártás területére is. Az elmúlt közel 100 évben a világon leggyakrabban használt AlSi öntészeti ötvözetek széleskörű felhasználása előtt az USA-ban élő magyar származású Pacz Aladár 1920. február 13-án USA-ban benyújtott úttörő szabadalma nyitotta meg az utat. Az USA Szabadalom 1921. 08. 12-én jelent meg, száma: 1.387. Pacz Aladár Magyarországon 1920. 12. 4-én nyújtotta be szabadalmi leírását magyar nyelven, amelyik csak 1931. május 1-én kapta meg a védettséget, a szabadalom száma: 87.034.

A szabadalomban Pacz Aladár precízen megfogalmazott eljárása -a folyékony állapotban, öntés előtt végzett nemesítés- biztosította az utat a -ridegség, és a rossz megmunkálhatóság miatt, addig gyakorlatilag használhatatlan- a 6-12% szilícium tartalmú öntészeti AlSi ötvözetek széleskörű felhasználása előtt.

Pacz Aladár kísérletei során NaF-tartalmú sókkal kezelte az eutektikus összetételű alumínium-szilícium ötvözeteket, amikor felismerte a nátrium nemesítő hatását. A nátrium hatására lecsökken az ideális alumínium-szilícium ötvözet egyensúlyi diagramján feltüntetett eutektikus hőmérséklet, ugyanakkor az eutektikus pont a nagyobb Si % tartartalom irányába tolódik el. Ennek következtében az optimális mennyiségű nátriumot tartalmazó ötvözet kristályosodásakor nem jelennek meg primer szilícium poliéderek és a szövetszerkezet nemesítés után csak primer dendriteket (1,65% szilíciumot tartalmazó α szilárdoldat) és az eutektikum kristályosodásakor az α szilárdoldat mellett finom eloszlású szilícium lemezeket tartalmaz (3. ábra) .



3. ábra: Folyékony állapotban optimálisan nemesített eutektikus összetételű AlSi ötvözet eutektikumának kristályosodásakor kiváló Si fázis [1]

Az alakos öntvények gyártásakor a legnagyobb mennyiségben feldolgozott hipoeutektikus és eutektikus összetételű alumínium-szilícium ötvözetek folyékony állapotban történő nemesítésének (az eljárást nem szabad összetéveszteni az ugyancsak nemesítésnek nevezett hőben való kezeléssel, ami egy magasabb hőmérsékleten történő homogenizálást követő gyors hűtésből és egy megeresztésből áll) az a célja, hogy:

- a kristályosodás kezdeti stádiumában visszaszorítsa a nagyméretű primer szilícium poliéderek kiválásának lehetőségét megakadályozza, továbbá
- megakadályozza az eutektikus kristályosodás során a lemezes, és a szemcsés szilícium kristályok megjelenését, és egyidejűleg az egyenletes finomszemcsés szilícium kiválását segítse elő az eutektikum kristályosodásakor.

A helyesen nemesített 6-13% Si-tartalmú alumínium-szilícium ötvözetekben az eutektikum Si kristályai rövidek, nem hosszúkásak, és nem végződnek tűszerűen (mint a lemezes

szilíciumé), hanem lekerekítettek, továbbá nincsenek hegyes sarkaik (mint a szemcsés szilíciumé), mert a nemesítéshez használt elem ezt a kristályosodás során megakadályozza. A folyékony állapotban végzett nemesítés eredményeként nemcsak az eutektikum kristályosodása során kivált Si morfológiája változik meg, javulnak az ötvözet mechanikai tulajdonságai is elsősorban a szívóssági tulajdonságok [1].

1.2 Hipoeutektikus és eutektikus összetételű alumínium- szilícium ötvözetek tartós nemesítése stronciummal

Az ipari termelés új öntési technológiák kifejlesztését is eredményezte. E tevékenység egyik eredménye az alacsonynyomásos öntési technológia és a tartós nemesítési eljárás kidolgozása volt. A későbbiek folyamán, a Sr-mal végzett tartós nemesítés, az alacsonynyomásos öntési technológiát alkalmazó öntődéken kívül fokozatosan alkalmazást nyert a gravitációs kokilla öntődékekben is. Ennek praktikus oka, a rövididejű nemesítéshez használt, Na-tartalom hatásának gyors „lecsengése” (kiegése) okozta problémák elkerülése volt.

Hipoeutektikus és eutektikus összetételű alumínium-szilícium ötvözet olvadákokba bevitt kis mennyiségű Sr a Na-hoz hasonlóan az öntészeti AlSi ötvözetek eutektikumának kristályosodásakor lényegesen hosszabb idő intervallumban tudja biztosítani a szilícium kedvező morfológiájú kiválását. Ezért a Sr ipari méretekben nemesítő elemként kerül alkalmazásra [3].

A Sr hatásmechanizmusa hasonló a nátriuméhoz, és az eutektikum kristályosodásakor fejt ki a hatását azáltal, hogy a Sr is csökkenti a Si diffúziós sebességét. Az olvadékba beoldódott Sr ugyanúgy, mint a Na, a hipo- és eutektikus összetételű AlSi ötvözetekbe kerülve csökkenti kristályosodáskor az ötvözet eutektikus hőmérséklet értékét és az eutektikus hőmérséklet csökkenésével arányosan az eutektikus összetétel a nagyobb szilíciumtartalom irányába tolódik el. Összehasonlítva a Na és a Sr okozta eutektikus hőmérséklet csökkenést megállapítható, hogy a Sr hatására az eutektikus hőmérséklet csak kisebb mértékben csökken, mint a Na hatására. A szilícium diffúziós sebességének csökkenése eutektikum kristályosodásakor kedvezően szabályozza a Si fázis morfológiáját, és a Na hatásához hasonló szövetszerkezetet eredményez.

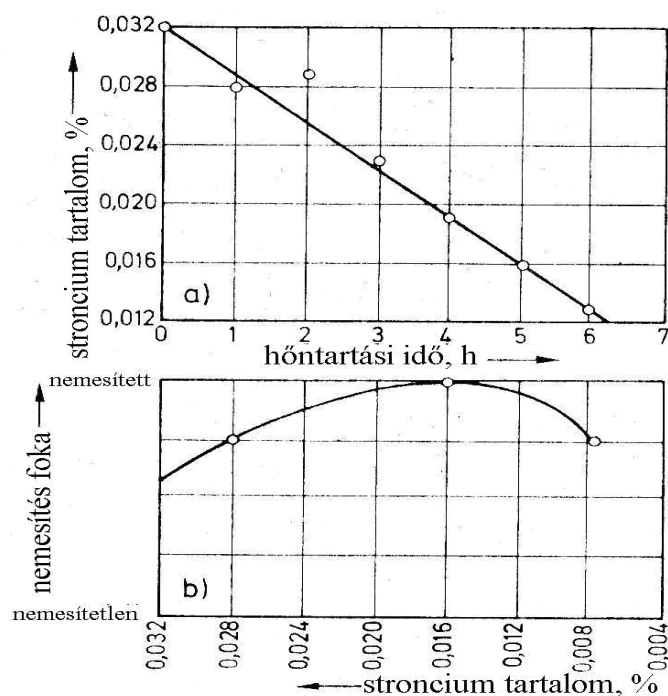
1.2.1 Stronciumos nemesítés összehasonlítása más nemesítésekkel

A stroncium az alumíniumötvözet olvadékában foszfort vesz fel, és ezzel semlegesíti a foszfornak a szövetszerkezet kialakulására gyakorolt káros hatását. Ebben a vonatkozásban hatása hasonló, mint a nátriumos nemesítésé, és mindkét esetben a nemesítési adalékokat annyival nagyobbra kell méretezni, hogy a foszfor mennyiségét vegyük figyelembe az olvadékban, valamint annál nagyobb kell, hogy legyen az adalék mennyisége, minél lassabb a dermedés.

Általában igaz, hogy a stronciumadalékot valamivel nagyobbra kell méretezni, mint a nátriumadalékot a nátriumos nemesítésnél. 0,025 % stronciumadagolás általában elegendő szokott lenni. Feltétel azonban emellett, hogy ne legyenek különösen magas foszfortartalmak az anyagban, amely nemesítésre kerül, mert ez jelentős többletráfordítást igényelne stronciumból. A Sr az alumínium-szilícium olvadékokban ternér kötéseket hoz létre, mely nagymértékben képes a foszfor felvételére, és képes arra, hogy ennek a dermedésre gyakorolt hatását megkösse.

A stroncium nemesítő hatása sokkal tovább érvényesül, mint a nátriumé, de lecsengési ideje nem olyan hosszú, mint az antimoné. Az irodalom szerint a stroncium kiégési sebessége csak 1/10-e a nátriuménak, így hatékonysága gyakran 7 óra vagy annál is hosszabb idő. Bizonyos mértékben a stroncium visszamarad az öntvényben, így újraolvasztás esetén is tart a nemesítő hatása. Azonban itt fellép egy bizonyos leégési veszteség, ami a nemesítési hatás veszítéséhez vezet.

A nemesített olvadékban a stroncium-tartalom folyamatosan csökken az órák múlásával, csak a folyamat jóval lassabban zajlik le, mint nátriumos nemesítésnél, és nem is szinkronban a nemesítési hatással.



- a) A hőntartási idő hatása a stroncium tartalomra,
 b) A stroncium tartalom hatása a nemesítési fokra.

4. ábra

A gyakorlatban a stronciumos nemesítést részben a kokillaöntésnél, és az alacsony nyomású öntésnél vezették be. Ahhoz, hogy jó nemesítést érjünk el, viszonylag gyors dermedést kell megvalósítani stronciummal nemesített ötvözeteknél. Tekintettel kell lennünk a hőntartásra és az átolvadásra és ajánlatos az ötvözetben 0,005 %-nál nagyobb stronciumtartalmat megvalósítani

A stroncium a nátriummal teljesen összeférhető, ezért ha a fémolvadékban mindkét elem jelen van, nemesítő hatásuk összegződik, így előnyeik kihasználhatók és hátrányaik minimálisra csökkenthetők.

Így kedvezőnek tűnik, hogy a nátrium azonnali reagálását az olvadékba való bekerülés után kihasználjuk, és felhasználjuk a stronciummal szemben, ami megfelelő inkubációs idő után kezd csak hatni, valamint fel kívánjuk használni a nátriumos nemesítés gyors megszűnését, amit kompenzálni tudnánk a stroncium időben növekvő hatásával.

A két adalék alkalmazásakor nem állnak fel ellentétes jelenségek, tehát a nátrium és a stroncium egyidejű jelenlétekor, meghatározott területeken a két elem könnyen összegezhető nemesítési hatást képes kifejteni. Rövid állás és hőntartási idő mellett a nátrium hatása kerül túlsúlyba, hosszabb várakozási idő mellett viszont a stronciumé. A nátriumnak az olvadékban való csökkenésével csökken a nátriumnemesítésre jellemző mikrolunckerképződési, és nő a

makrolunkerképződési hajlama. A stroncium nemesítésű fém a maga lunkerképződési viszonyaival a nemesített és a nem nemesített fém között helyezkedik el.

Amennyiben tehát csakis ezen két elem nemesítési hatásáról van szó, nem kell félni a zavaró jelenségektől. A stroncium tartalmú ötvözetek rövid ideig tartó nátriumos utánnemesítése mindenesetre egy kedvező lehetőséget kínál a gyakorlati öntőüzemekben a nemesítési hatás biztosítására.

A stroncium használatának előnye, hogy nem csökkenti olyan mértékben a fémolvadék folyékonyságát, mint a nátrium.

Irodalmi adatok állítása szerint a stronciummal történő módosítás hatására növekszik a H_2 -gáz felvétel. Bebizonyosodott azonban, hogy ez a jelenség elsősorban a fém stroncium adagolása esetén lép fel, és jelentősen csökkenthető, ha a stronciumot binér vagy tercier segédötvözetek formájában adagolják. Ezen felül, ez a jellegű gázfelvétel a megfelelő adagolási mód megválasztásával minimumra csökkenthető.

A stroncium érzéketlen a túlnemesítés szempontjából. Nagyobb mennyiségű stroncium adagolása sem vezet az öntvények ridegedéséhez, hacsak nem történik olyan mértékű túladagolás, hogy stroncium vegyületek keletkeznek. Ebből kifolyólag a stroncium adagolás gyakorlati tűréshatára a jól módosított folyékony fém biztosítása szempontjából sokkal tágabb, mint más elemeké.

Ez az elem nem vet fel egészségügyi problémákat, tárolása és adagolása egyaránt könnyebb, mint a nátriumé. Kisebb illósága ugyancsak csökkenti a használata során felmerülő nehézségeket, a kemencében és a kemence bélésanyagában egyaránt [3].

1.2.2 A stroncium hatása a hidrogén-oldhatóságra

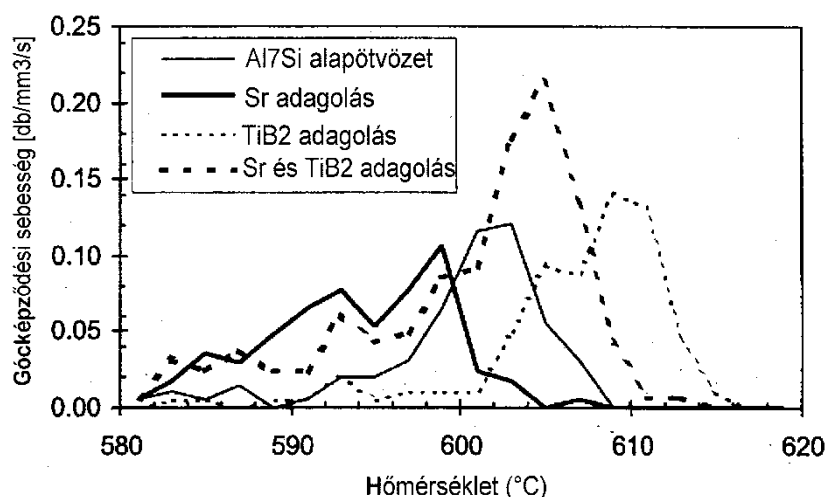
Iwahori és társai a porozitás növekedését stroncium adagolás esetén az olvadékban maradó hidrogén növekedésének tulajdonították. Denton és Spittle megmérték az Al-Si olvadékok fogékonyságát a hidrogénfelvételre, és arra a következtetésre jutottak, hogy a stroncium növeli az abszorpciós sebességet. Gruzleski és társai megmérték az olvadékok visszagázosodási sebességét stroncium adalékkal és anélkül. Azt tapasztalták, hogy a stroncium nem változtatja meg a visszagázosodási sebességet. Jacob és társai felvetették, hogy a stroncium megköti az olvadékban feleslegben lévő H-t olyan hidridként, amit ezekben

a gázbevezetési/gáztalanítási kísérletekben nem mérték. A stroncium hatását a hidrogén olvadékba történő oldódására, valamint az abszorpciós sebességekre még vitatják.

Tynelius és társai azt tapasztalták, hogy a stronciummal való módosítás növeli a százalékos porozitást és a legnagyobb pórushosszat, miközben csökkenti a póruessűrűséget A356.2 öntvényekben, mind végűtésű, mind állítható szögű ékes kokillákba öntve. A kísérletsorozatból kapott adatok statisztikai modellezésével azt az eredményt kapták, hogy 258 ppm stroncium hozzáadása kevesebb, de nagyobb pórust hozott létre, abszolút értékben kb. 250 mikronnal növelve az átlagos pórushosszat és kb. 0,35%-kal növelve a százalékos porozitást. Tynelius és társai szerint a mechanizmus az oxid-szerkezet és -tartalom változása, ami jobb göcképződési pontokat ad és csökkenti a buborékok határfelületi területét, ha azok az oxid mentén növekednek [4].

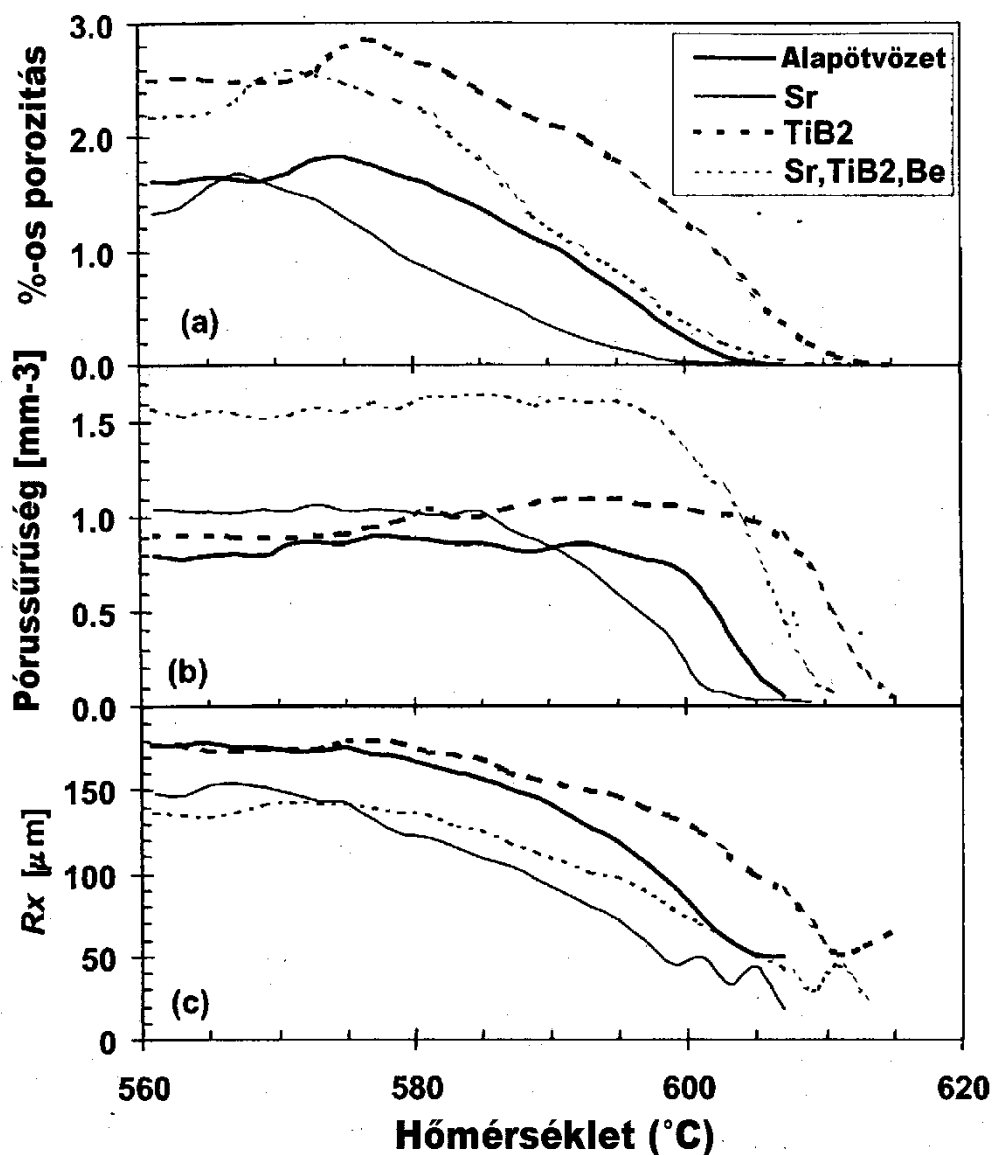
1.2.3 A Sr-mal való módosítás hatása a pórusok göcképződésére

A Sr-mal való módosításnak a pórusok göcképződésének gyakoriságára gyakorolt hatása látható az 5. és a 6. ábrán a hőmérséklet függvényében, közepes V sebességnél az alap Al-7Si ötvözetre (E01), Sr-mal módosított ötvözetre (E05), TiB₂-os szemcsefinomításra (E07) és Sr-mal módosított és TiB₂-os szemcsefinomítású, továbbá Be adalékos ötvözetre (E11). Ezekben az esetekben a göcképződési görbék elmozdulnak a kisebb hőmérsékletek felé [5].



5. ábra

Pórusok göcképződésének hisztogramja a hőmérséklet függvényében [5]



6. ábra: A százalékos porozitás a pórusűrűség és az ekvivalens átlagos pórusugár számszerűen meghatározva a hőmérséklet függvényében

(a) százalékos porozitás, (b) pórusűrűség és (c) ekvivalens átlagos pórusugár számszerűen meghatározva a hőmérséklet függvényében a következő radiográfiás mérések eredményeiből: Al-Si alapötvözet (E01 - vastag folytonos vonal), Sr-mal módosított (E05 - vékony folytonos vonal), TiB₂-os szemcsefinomítás (E07 - vastag szaggatott vonal) és Sr-mal módosított és TiB₂-os szemcsefinomítású ötvözet (Be-mal, E11 - vékony szaggatott vonal) [5],[6]

2. AZ EUTEKTIKUS Si NEMESÍTETTSÉGÉNEK VIZSGÁLATI MÓDSZEREI

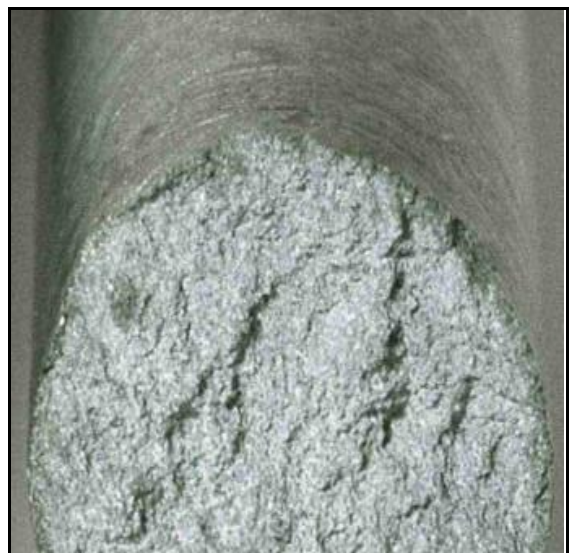
2.1 Töretpróba

A nemesítés ellenőrzésekor a legegyszerűbben alkalmazható technológiai próba az úgynevezett töretpróba. Erre a célra 10...20 x 100...150 mm próbatesteket öntenek homokformába, vagy tartósformába (fém- vagy grafitkokillába). A minősítés a lehűlt próba töretének jellege alapján történik. A durva szemcsés töret elégtelen mértékű nemesítésre vall (7. ábra). Amikor a töretfelület sík, egyenletes és galambszürke színű, akkor a nemesítés megfelelő (8. ábra), és az öntést el lehet végezni [1].

A töretpróba alkalmazása ipari gyakorlatban nem elterjedt, mert bár rendkívül költséghatékony megoldást tesz lehetővé, a nemesítés fokáról mégsem szolgáltat kellő információt a vizsgálatot végző személy felé.



7. ábra: Nem nemesített próbatest
töretképe [1]



8. ábra: Optimálisan nemesített próbatest
töretképe [1]

2.2 Csiszolatpróba

A nemesítettségi állapot jellemzése történhet metallográfiai vizsgálatok elvégzésével is, vagyis csiszolatpróba segítségével. Ilyenkor a leöntött, majd lehűlt próbából kimunkált mintát kell csiszolni, polírozni és mikroszkópon ellenőrizni az eutektikum kristályosodásakor kivált szilícium morfológiáját. Az eljárás pontos, megbízható - különösen akkor, ha próbaöntvénynek ék alakú hasábot választottunk, ilyenkor a hűtési sebesség hatása is megállapítható-, de időigényessége miatt a fém Na-mal ill. a NaF tartalmú nemesítősókkal történő nemesítéskor üzemszerűen nem alkalmazzák.

Ugyanakkor az ASTM szabvány szerint a nemesítési fok ellenőrzésekor a nemesítés után az olvadékból öntött próbatest meghatározott metszetéből kell csiszolatot készíteni. A polírozott és maratlan csiszolat képen 100x-os nagyításban, egy 6 fokozatú etalon sorozattal kell összehasonlítani (az etalon rövididejű és hosszúidejű nemesítéskor is alkalmazható (9. ábra). A 6 fokozatú etalon sorozat alapján kell meghatározni, hogy az etalonon bemutatott egyes fokozatokból hány százalékot tartalmaz a minta, és ennek alapján lehet kiszámítani a nemesítés fokát (NF) [1].

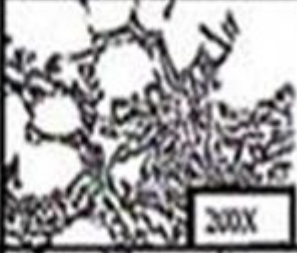
Például.:

- ha, az etalonsorozat harmas fokozatából 20 %,
- a négyes fokozatból 50%
- az ötös fokozatból 30 % van jelen, akkor:

$$\text{NF (nemesítés foka)} = (0,2 \times 3) + (0,5 \times 4) + (0,3 \times 5) = 4,1$$

NF értékének növekedése a nemesítés sikerességével arányosan növekszik.

Összességében a csiszolatpróba segítségével jó közelítéssel kapunk képet a nemesítés fokáról. Az ipari gyakorlatban ez az ellenőrzési mód mégsem terjedt el, hiszen a vizsgálatok időtartama alatt a kemencében lévő olvadékból a Sr hatása részben megszűnhet ill. az időszükséglet mellett még jelentős költség is hozzátársul az ellenőrzési folyamathoz.

Sr mennyiség	mikrostruktúra jellemzése	maratlan csiszolat
8 ppm	nem modifikált Al-Si ötvözet eutektikum kristályosodásakor kivált szilícium	 200X
38 ppm	alul modifikált Al-Si ötvözet eutektikum kristályosodásakor kivált szilícium	 200X
56 ppm	részlegesen modifikált Al-Si ötvözet eutektikum kristályosodásakor kivált szilícium	 200X
72 ppm	optimálisan modifikált Al-Si ötvözet eutektikum kristályosodásakor kivált szilícium	 200X
96 ppm	modifikált Al-Si ötvözet eutektikum kristályosodásakor kivált nagyon finom szilícium	 200X

9. ábra: Összefüggés a stroncium mennyisége és az eutektikum kristályosodásakor kivált Si morfológiája között [1]

Az első fokozat a nemesítetlen állapotnak megfelelő képet mutatja, a hatodik fokozat az optimálisan nemesített állapotra jellemző.

2.3 Szakítópróba

A nemesítettségi állapot jellemzésére, ellenőrzésére elvileg használhatók a szilárdsági vizsgálatok is. Ilyenkor szabványos méretű szakítópróbapálcát kell önteni, és a vizsgálatokat lehűlés után a kimunkált szakítópálcán (10. ábra) kell elvégezni. A próbapálcát általában fémkokillába (11. ábra) öntik. Bár a szakítószilárdság és a nyúlás értékek nagyon jó információkat nyújthatnak az olvadék metallurgiai állapotáról, üzemszerűen a fém Na-mal, ill. a NaF tartalmú nemesítő sókkal történő rövididejű nemesítéskor, alkalmazása egyáltalán nem jöhet számításba, mert a vizsgálat hosszú időt vesz igénybe. Így, bár a kapott mérési eredmény megbízható és pontos információ lenne, nem használható, mert a vizsgálatok időtartama alatt a kemencében lévő olvadékból a Sr hatása részben vagy teljesen megszűnhet [1].



10. ábra: A kimunkált szakítópálca



11. ábra: A fémkokillába öntött szakító próbapálca

2.4 Spektrométeres elemzés

A spektrométeres analízist (12. ábra) - az árak csökkenésével arányosan- egyre több üzemben alkalmazzák a nemesítettségi állapot ellenőrzésére is, a kémiai elemzés mellett. A vizsgálat gyors -főleg, megfelelő csőposta kiépítés esetén- és sorozat vizsgálatok esetén viszonylag kicsi a költség vonzata. Hátránya feltétlenül, hogy a módszer segítségével csak az egyes elemek abszolút mennyiségét lehet meghatározni, az eljárás nem tudja különválasztani a kristályosodást kedvezően befolyásoló hatékony, és a kristályosodást befolyásolni nem tudó -vegyület formában lekötött- inert elemek mennyiségét. Ennek ellenére öntödékben a módszer egyre szélesebb körben terjed. Ennek oka az is, hogy a gyártásközi ellenőrzésbe ilyenkor olyan műszer bevonására kerül sor, melyet a végtermék kémiai összetételének ellenőrzésekor is használnak, így a berendezés kihasználtsága javul és az üzemeltetési költségek megoszlanak.

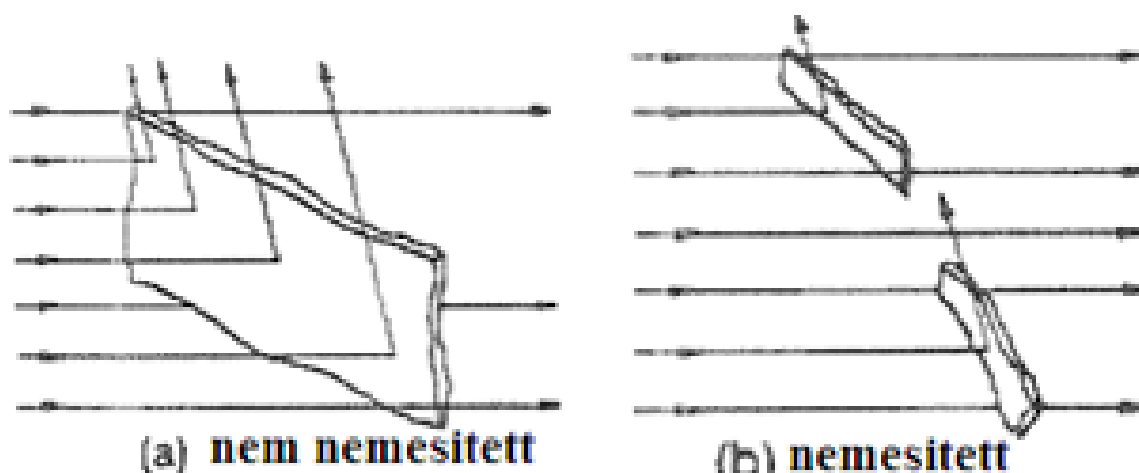
Ennek ellenére a felsorolt okok miatt a nagyobb gyártási biztonság elérése érdekében, a gyártásközi ellenőrzésnek ezt a módját szükségesnek, de nem elégségesnek lehet minősíteni [1].



12. ábra: Öntödei optikai spektrométer [7]

2.5 Elektromos vezetőképesség mérés

Az AlSi ötvözetek elektromos vezetőképessége függ az eutektikum kristályosodásakor kiváló szilícium fázis alakjától. Ezen az alapon az ötvözet elektromos vezetőképesség mérésével roncsolásmentesen meghatározható a nemesítés foka. A szilícium összességében nem vezető. Amikor a nemesítetlen ötvözet eutektikumának kristályosodásakor a szilícium durva, lemez alakú formában kristályosodik, akkor a szilícium lemezek lecsökkentik az ötvözet elektromos vezetőképességét (13. ábra).



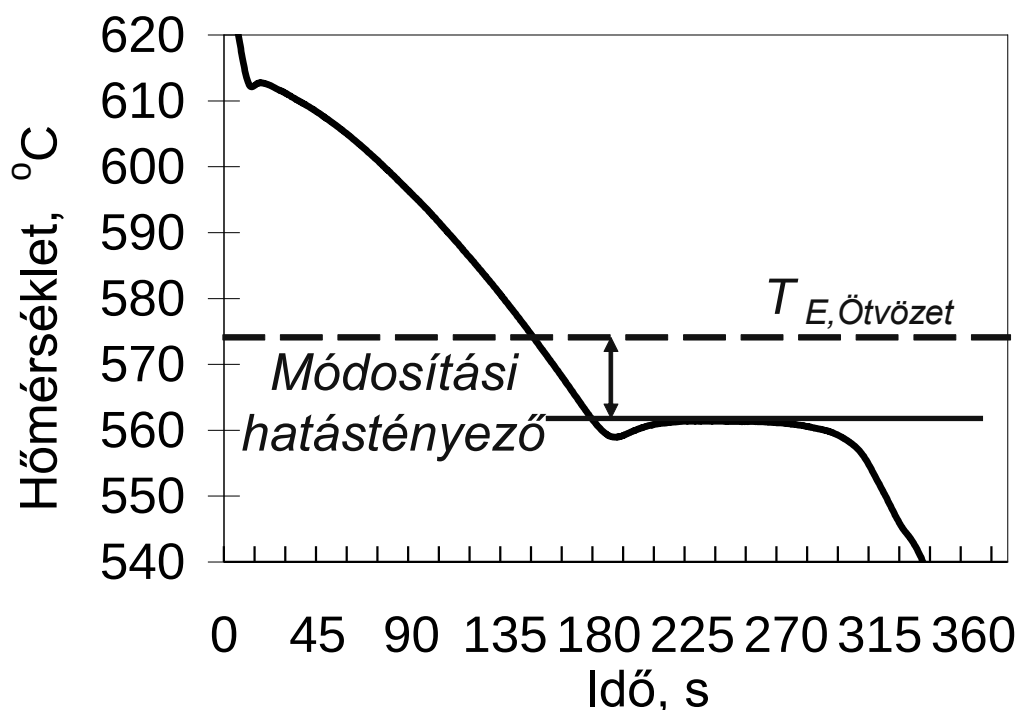
13. ábra: Szilícium lemezek nem nemesített és nemesített formában [1]

A módszer segítségével az olvadék nemesítettségi foka rézkokillába, vagy grafitformába öntött egy spektroszkópos mintához hasonló darabon mérhető. A próbatest öntése után egy előre meghatározott idő, (általában 5-10 perc) elteltével a próbatestet vízben hűtik és mérik a vezetőképességét. Ilyen mintákat a nemesítés előtt, és utána is készítenek, majd a kapott értékeket összehasonlítják, és ennek alapján döntenek el, hogy lehet, vagy nem lehet önteni. A nemesítés megfelelő, ha az olvadék vezetőképessége legalább 10 %-kal nő, a nemesítést követően vett minták esetén ≈ 5 %-os növekedés általában részleges nemesedésre utal, ha pedig nincs változás, akkor a kezelés sikertelen volt. Az elektromos vezetőképesség mérésének előnye, hogy adott ötvözet esetén független az ötvözet kémiai összetétel változásától, ellentétben a termikus analízissal tapasztaltakkal szemben. Hátránya viszont, hogy pontatlan információt ad a nemesítettség fokáról [1].

2.6 Termikus analízis

2.6.1. Termikus analízis során kapott lehűlési görbe

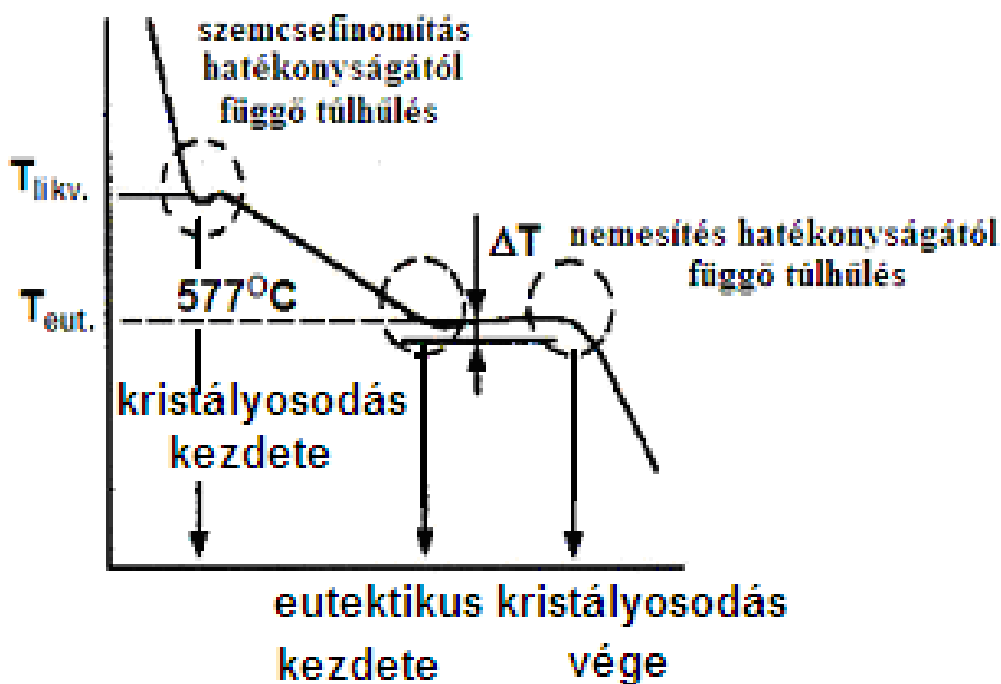
A lehűlési görbe az idő függvényében a vizsgált minta hőmérsékletváltozását mutatja a folyékony fázistól, a dermedő fázison át a teljesen szilárd állapotig. A vizsgálat eredménye egy hőmérséklet-idő görbe, melynek alakját a dermedés során létrejövő fázisok kiválása és azok átalakulásuk határozzák meg. A módosítás sikerességét az öntészeti gyakorlatban a termikus analízis során meghatározott módosítási hatástényező alapján, illetve etalonképekkel történő összehasonlítással végzik. A módosítási hatástényező („Veredelung-V”), az eutektikum tényleges megszilárdulási maximum hőmérsékletéből és az adott ($T_{E,Ötvözet}$) ötvözetre számolt eutektikus hőmérsékletből számítható (14. ábra). Módosítottnak, azaz megfelelőnek minősítenek egy öntvényt, ha a módosítási hatástényező nagyobb vagy egyenlő 8.



14. ábra: A módosítási hatástényező értelmezése [8]

2.6.3 Termikus analízis során kapott hőmérséklet-idő görbe jellegzetes pontjai

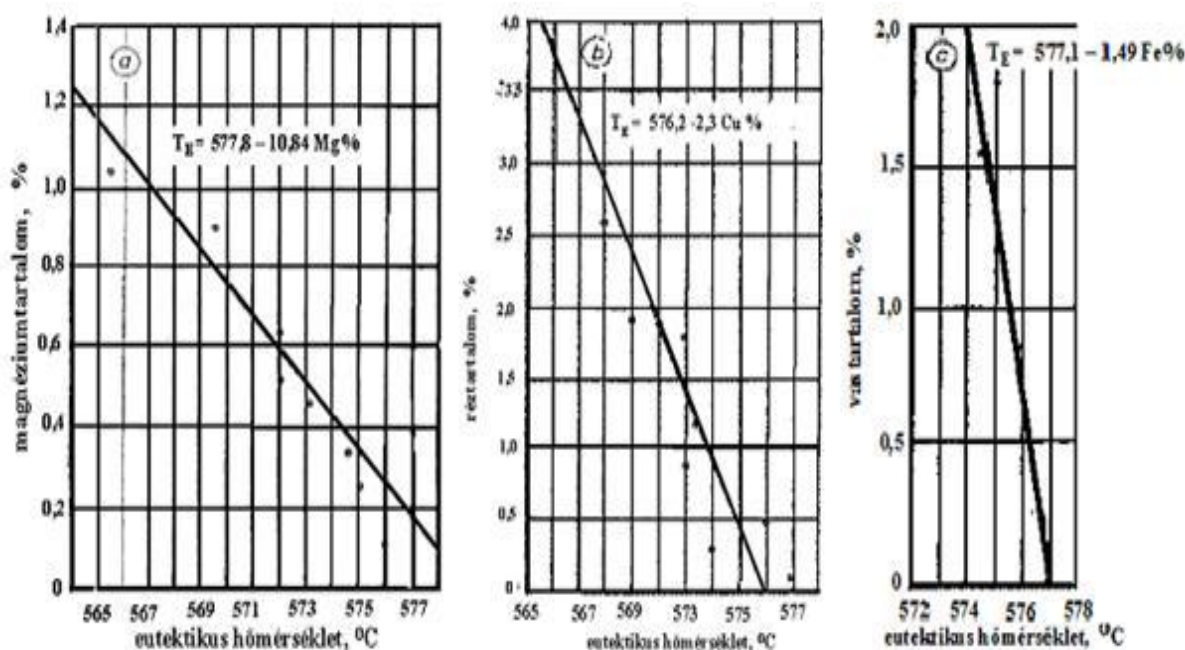
A gyakorlatban a kristályosodás mindig kisebb-nagyobb túlhűléssel kezdődik. A túlhűlés, termodinamikai hajtóerő a folyamat számára. A kristályosodás megkezdésekor látens hő szabadul fel, ennek következtében a hőmérséklet az egyensúlyihoz közelire emelkedik. A kristályosodás kezdetén a primer fázis az olvadék csíráállapotától függően a $\Delta T_o, ^\circ\text{C}$ túlhűlés-, az eutektikus kristályosodás $\Delta T_E, ^\circ\text{C}$ túlhűlés után kezdődik (15. ábra). A túlhűlések nagysága ($\Delta T_o, ^\circ\text{C}$, $\Delta T_E, ^\circ\text{C}$) döntő mértékben befolyásolja az öntött szövetszerkezetet. A likvidusz hőmérsékleten mért túlhűlés értéke a primer fázis szemcsefinomítás hatékonyságával, az eutektikus kristályosodáskor mért túlhűlés értéke a folyékony állapotban végzett nemesítés hatékonyságával és az eutektikum kristályosodáskor kivált szilícium fázis morfológiájával arányos. A 15. ábrán látható ideális lehűlési görbén jelöltem a görbe azon pontjait, melyek a termikus analízis során kiértékelésre kerülhetnek.



15. ábra: Termikus analízis során kapott hőmérséklet-idő görbe jellegzetes pontjai [1]

2.6.4 A termikus analízis segítségével való ellenőrzés gyakorlata

A vizsgálat megkezdése előtt mindig ki kell választani - a gép memóriájából- a vizsgált ötvözet szabványos jelölését, majd meg kell adni az aktuális ötvözet tényleges Mg, Cu, és Fe tartalmát. Erre azért van szükség, mert az ötvöző elemek minőségüktől és mennyiségüktől függően jelentősen módosítják, úgy a likvidusz, mint az eutektikus hőmérséklet értékeket (16. ábra), figyelmen kívül hagyásuk a mérési eredmények kiértékelésekor hibát okoznak.



16. ábra: Összefüggés az alumínium-szilícium ötvözetek eutektikus hőmérséklet változása a magnéziumtartalom, a réztartalom és a vastartalom között

A korrekciós módosítást minden esetben érdemes elvégezni. Az elmúlt években -kísérleti eredmények alapján- több összefüggés látott napvilágot, melyek felhasználhatók a nemesítetlen hipo- és eutektikus összetételű alumínium-szilícium ötvözetek eutektikus hőmérsékletének számítására [1].

Az MK berendezés az alábbi összefüggéssel számol [9]:

$$T_{\text{eutektikus hőm}} (^{\circ}\text{C}) = 577 - \text{Fe}\% \times 1,8 - \text{Mg}\% \times 11,0 - \text{Cu}\% \times 2,5$$

3. SAJÁT KÍSÉRLETEK

3.1 Célkitűzés

Az öntőde a beérkező alumínium esetében 150 ppm és 200 ppm közötti értéket határozott meg a Sr mennyiségére. Az üzemben viszont az öntés előtti előírt Sr mennyiségének 200 ppm és 250 ppm között kell lennie. Az adatokból tisztán látszódik, hogy az öntés előtti technológia során többlet Sr bevitelt kell alkalmazni, hogy az előírt Sr tartalmat tudják biztosítani. A cég választ keres arra, hogy kell-e üzemi körülmények között Sr többlet bevitelt alkalmazni, hiszen a többlet Sr adagolása káros hatással bír nemcsak az olvadék, hanem a kész öntvény tulajdonságaira is. Az olvadékban lévő többlet Sr megnöveli a zárványtartalmat, illetve a kemencében leégést eredményez. Irodalmi adatok állítása szerint a bevitt többlet Sr az olvadék hidrogénfelvételének sebességét megnöveli, ill. hatására növekszik az alumínium-ötvözetekből készült öntvények porozitása, és ez nagymértékben lecsökkenti a kész öntvény mechanikai tulajdonságait.

A Miskolci Egyetem Metallurgiai és Öntészeti Tanszék kutatási együttműködés keretében vizsgálta az optimális Sr tartalmat. Ebben a kutatómunkában és a kísérleti eredmények feldolgozásában vettem részt. A kísérletek célja a beadagolandó optimális stroncium-mennyiség meghatározása, amelynél a szilárdsági tulajdonságok megfelelőek, illetve az elvárt követelményeknek is megfelel az öntvény.

Az alkalmazható stroncium-mennyiség meghatározása érdekében a következő vizsgálatokat végeztük el:

- oldott gáztartalom (hidrogén) műszeres mérése
- termikus analízis

3.2 Kísérleti körülmények

A méréseket a Miskolci Egyetem Metallurgiai és Öntészeti Tanszék Műhelycsarnokában laboratóriumi körülmények között végeztük. A kísérletek során kétféle ötvözetet vizsgáltunk, amelyet a cégnél a legnagyobb mennyiségben alkalmaznak. Az ötvözetekhez lépcsőzetesen adagoltunk Sr-ot, és azt vizsgáltuk a leöntött próbákon, hogy az egyre növekvő mennyiségű Sr- nak milyen hatása van az eutektikus Si morfológiájára az oldott gáztartalomra.

A vizsgált ötvözetek:

- AlSi9Cu1 (1. ötvözet)
- AlSi9Cu3 (2. ötvözet)

A kétféle ötvözet kémiai összetételét az 1. táblázatban tüntettem fel.

1. táblázat

A vizsgált ötvözetek kémiai összetétele

Elem	AlSi9Cu1 [%]	AlSi9Cu3 [%]
Si	9,32091	9,3264
Fe	0,14507	0,5835
Cu	0,911	2,8446
Mn	0,02628	0,2833
Mg	0,46629	0,3694
Cr	0,00123	0,0244
Ni	0,00566	0,0940
Zn	0,00791	0,6209
Ti	0,0203	0,0889
B	0,00023	0,00036
Ca	0,00028	0,0010
Cd	0,00024	0,0008
Li	0,00004	0
Na	0,00002	0,0001
P	0,0004	0,0002
Pb	0,00131	0,048
Sb	0,00168	0,0004
Sn	0,00138	0,0141
Sr	0,00131	0,0017
Zr	0,0019	0,0040
Al	89,0865	85,6937

3.3 A kísérleteknél alkalmazott vizsgálati módszerek

3.3.1 Sűrűségindex-vizsgálat

A sűrűség-index meghatározásához a folyékony alumínium ötvözetből két próbát kell venni. Az egyik próba normál, atmoszférikus nyomáson, míg a másik 80 mbar vákuumban szilárdul meg (17. ábra). Ezután egy speciális mérlegen mérjük le mindkét próbát levegőn és ismert sűrűségű folyadékba mártva. A mérleg az Arkhimédieszi - törvény szerint működik [3].

A sűrűségindexet a következő képlettel számolhatjuk ki:

$$DI = 100 * \frac{(\rho_A - \rho_B)}{\rho_A}, \text{ ahol}$$

ρ_A = atmoszférikus nyomáson megszilárdult próba sűrűsége

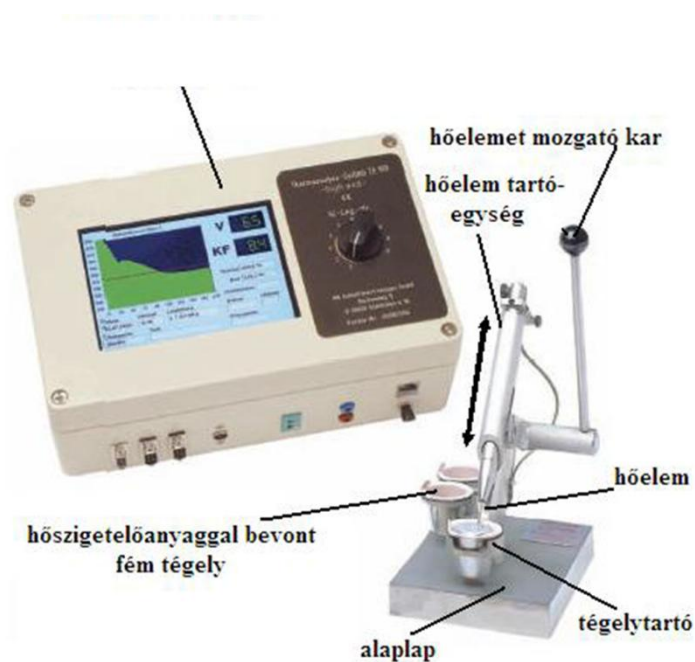
ρ_B = vákuumban megszilárdult próba sűrűsége



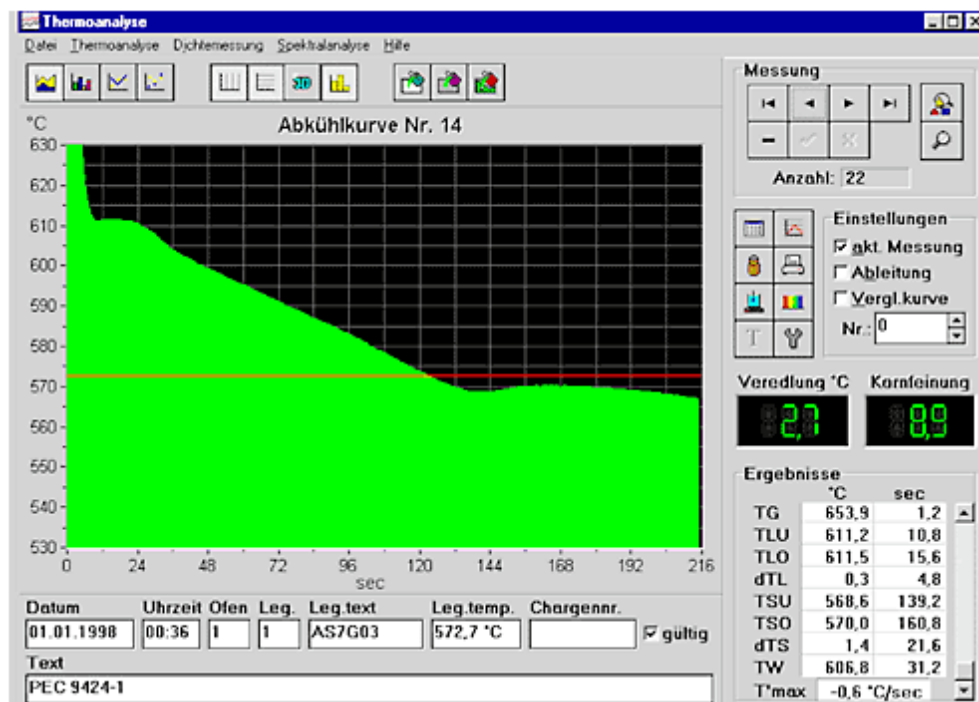
17. ábra: A sűrűség-index meghatározásához használt MK készülék és a vákuumban megszilárdult próbatest [9]

3.3.2 Termikus analízis

A termikus analízis mérését az MK-TA100 berendezéssel (18. ábra) végeztem. Ez a berendezés arra szolgál, hogy az Al-Si ötvözetek lehűlési görbéit (19. ábra) nyomon követhessük és kiértékeljük. A nemesítés fokáról, a szemcsefinomításról és az összes lezajló termikus változásról rövid idő alatt információt kaphatunk a berendezés segítségével. A termikus analízis kiváló lehetőséget nyújt arra, hogy a kialakuló fémszerkezetről információkat kapjunk az alumínium dermedése közben [3].



18. ábra: MK-TA100 berendezés főbb részei [9]



19. ábra: Az MK-TA100 készülék által felvett lehülési görbe [9]

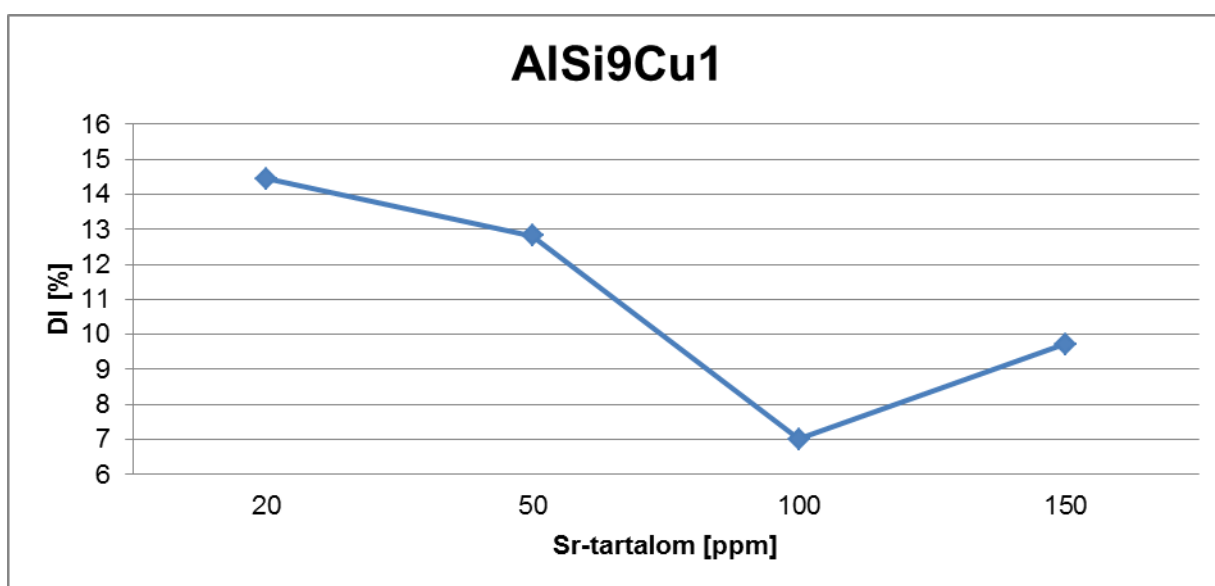
3.4 A Stroncium hatása az AlSi9Cu1 olvadék tulajdonságaira

3.4.1 Az oldott gáztartalom vizsgálata

A 2. táblázatban a különböző stroncium-tartalmú olvadékok mért sűrűség-index eredményeit mutatom be.

2. táblázat
A kísérleti olvadék Sr-tartalom és a sűrűség-index változása

Sr [ppm]	ρ_{szabad} [g/cm ³]	$\rho_{\text{vákuum}}$ [g/cm ³]	Sűrűség-index [%]	Olvadék hőm. [°C]
20	2,61	2,24	14,17 *	742
50	2,61	2,28	12,64 *	749
100	2,61	2,43	6,89	743
150	2,62	2,35	9,96	746



20. ábra: Sűrűség-index változása a Sr-tartalom függvényében

A kapott értékeket tanulmányozva kitűnik, hogy a 20 ppm és az 50 ppm Sr tartalomnál a sűrűség-index nagyon magas. * Az első 2 próba öntésénél önhibánkon kívül megnöveltük az olvadék gáztartalmát, az eltéréseket minden bizonnyal ez okozhatta. A többi próba vizsgálatánál már a szakirodalomban is található növekedéssel találkozhatunk. 100 ppm és 150 ppm Sr-tartalom között az olvadék gázfelvevő képessége jelentős mértékben változik.

3.4.2 Termikus elemzés eredményeinek kiértékelése

A termikus elemzést az MK-TA 100 készülékkel vizsgáltuk. A kapott eredményeket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat

A termikus elemzés során kapott eredmények

Sr [ppm]	TG [°C]	TLU [°C]	TLO [°C]	TEU [°C]	TEO [°C]	dTS [°C]	Telm. [°C]	ΔT [°C]
20	617,4	585,71	588,7	569,33	570,76	1,43	572,5	1,8
50	615,97	585,88	588,46	563,7	565,65	1,95	572,5	5,6
100	623,72	586,89	588,94	563,29	566,25	2,96	572,5	6,3
150	629,65	586,97	588,72	563,37	566,15	2,78	572,5	6,5

Jelmagyarázat a táblázathoz:

TG: max. hőmérséklet

TLU: likvidusz min. (alsó) hőmérséklet

TLO: likvidusz max. (felső) hőmérséklet

TEU: eutektikus min.(alsó) hőmérséklet

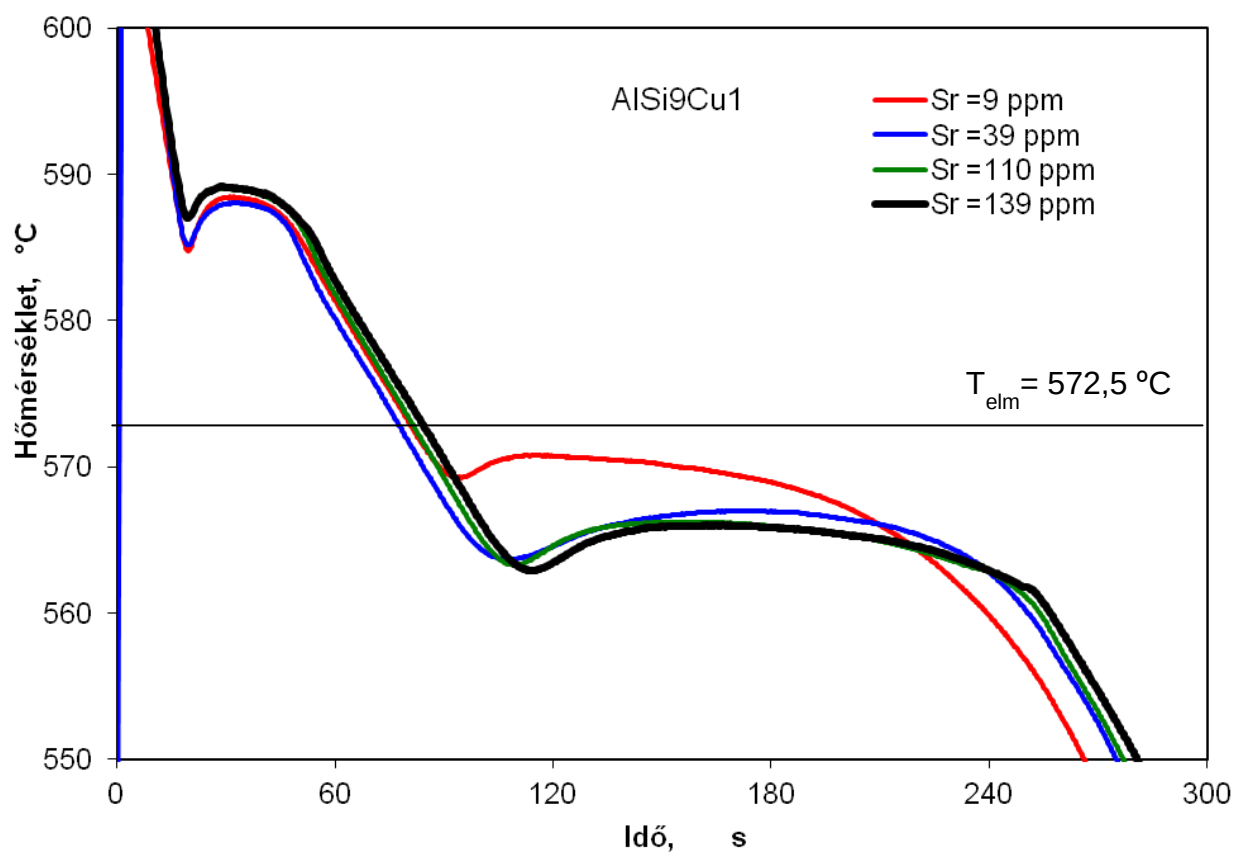
TEO: eutektikus max. (felső) hőmérséklet

dTS: eutektikus hőmérsékleten a min. és a max. hőmérséklet közötti különbség

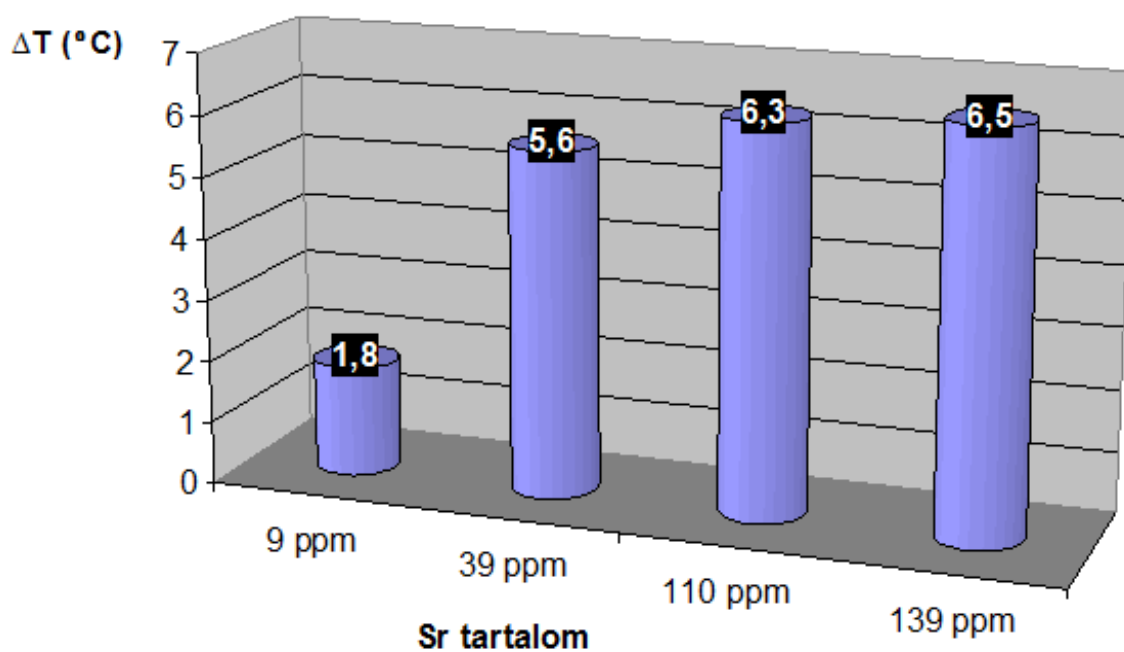
Telm.: elméleti eutektikus hőmérséklet

ΔT : eutektikus max. hőmérséklet és az elméleti eutektikus hőmérséklet közötti különbség

A kapott eredményeket tekintve világosan látszik, hogy a nemesítés a Sr adagolásával egyértelmű növekedést mutatott. Viszont az is látszódik, hogy 100 ppm és 150 ppm Sr adagolásnál már az eltérés szinte elhanyagolható. Tehát ebből arra lehet következtetni, hogy 20 ppm alatt a Sr nemesítésre kifejtett hatását gyakorlatilag elhanyagolhatónak tekinthetjük. A termikus analízis során kapott lehűlési görbéket a 21. ábrán szemléltettem. A ΔT értékeit a 22. ábrán ábrázoltam a jobb kiértékelhetőség végett.



21. ábra: A termikus analízis során kapott lehülési görbék



22. ábra: A ΔT változása a Sr-tartalom függvényében

3.5 A Stroncium hatása az AlSi9Cu3 olvadék tulajdonságaira

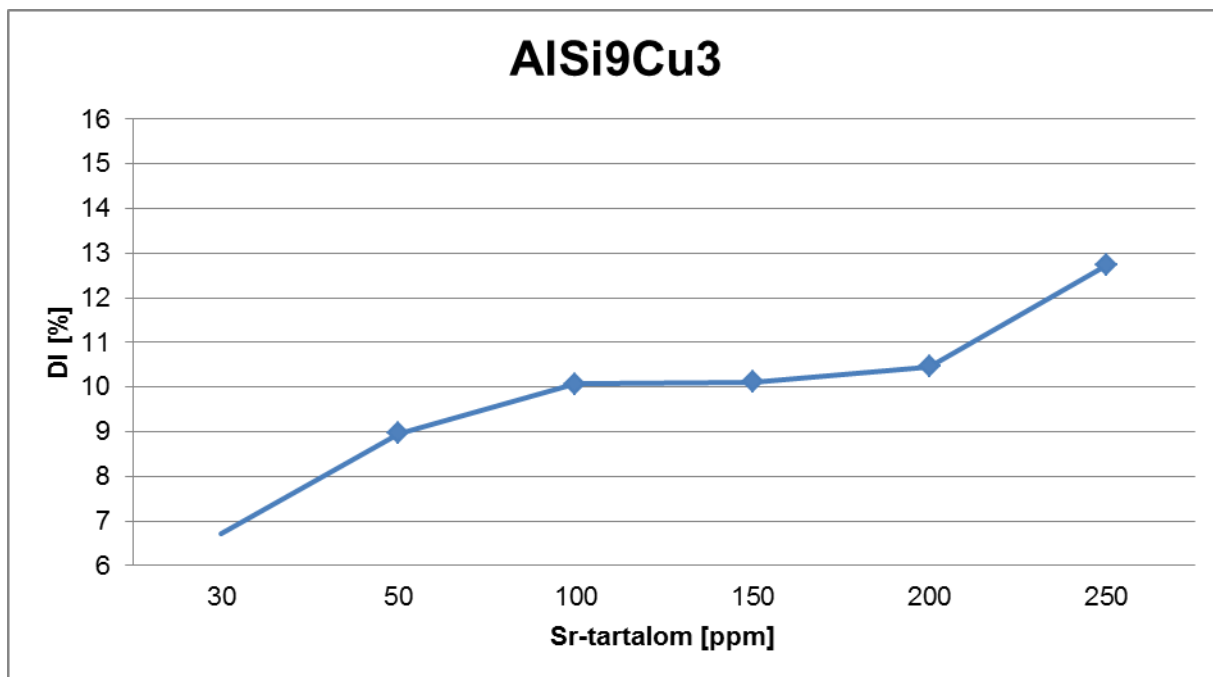
3.5.1 Az oldott gáztartalom vizsgálata

A 4. táblázatban a különböző stroncium-tartalmú olvadékok mért sűrűség-index eredményeit mutatom be.

4. táblázat
A kísérleti olvadék Sr-tartalom és a sűrűség-index változása

Sr [ppm]	ρ_{szabad} [g/cm ³]	$\rho_{\text{vákuum}}$ [g/cm ³]	Sűrűség-index [%]	Olvadék hőm. [°C]
50	2,68	2,44	8,96	746
100	2,68	2,41	10,07	745
150	2,67	2,4	10,11	746
200	2,68	2,4	10,45	749
250	2,67	2,33	12,73	741

A 4. táblázatból egyértelműen kitűnik, hogy a sűrűségindex értéke 50 ppm stroncium értéknél ugrik meg felfelé, viszont arról is információt kapunk, hogy 100 ppm és 200 ppm Sr tartalom között a sűrűség-index értéke szinte elhanyagolható mértékben növekszik.



23. ábra: Sűrűség-index változása a Sr-tartalom függvényében

3.5.2 Termikus elemzés eredményeinek kiértékelése

A termikus elemzést az MK-TA 100 készülékkel vizsgáltuk. A kapott eredményeket az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat

A termikus elemzés során kapott eredmények

Sr [ppm]	TG [°C]	TLU [°C]	TLO [°C]	TEU [°C]	TEO [°C]	dTS [°C]	Telm. [°C]	ΔT [°C]
50	608,35	578,85	581,57	555,6	557,75	2,15	564,78	9,18
100	612,4	577,7	581,26	555,63	557,7	2,07	564,78	9,15
150	610,72	578,72	582,51	556,05	560,58	2,53	564,78	8,73
200	613,5	577,6	581,25	556,11	558,49	2,38	564,78	8,67
250	614,83	578,82	581,32	556,63	559,52	2,89	564,78	8,15

Jelmagyarázat a táblázathoz:

TG: max. hőmérséklet

TLU: likvidusz min. (alsó) hőmérséklet

TLO: likvidusz max. (felső) hőmérséklet

TEU: eutektikus min.(alsó) hőmérséklet

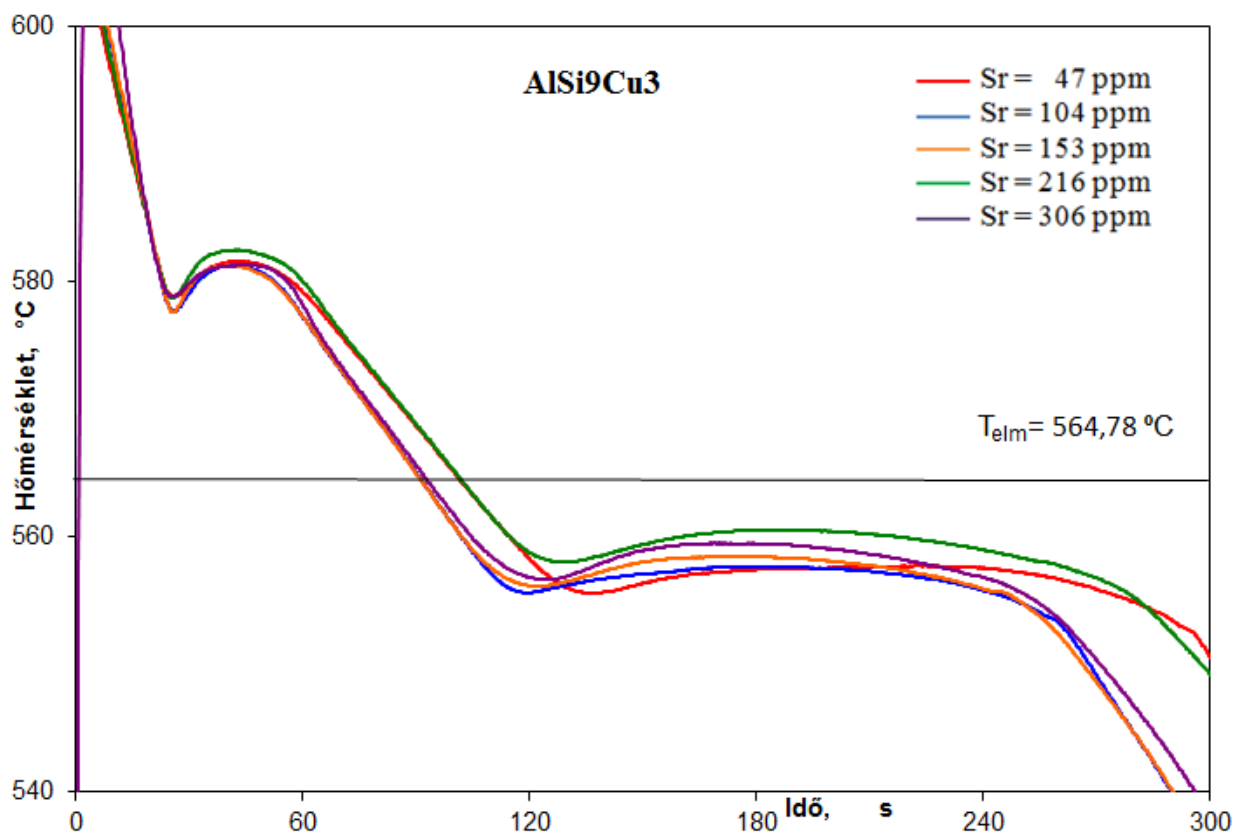
TEO: eutektikus max. (felső) hőmérséklet

dTS: eutektikus hőmérsékleten a min. és a max. hőmérséklet közötti különbség

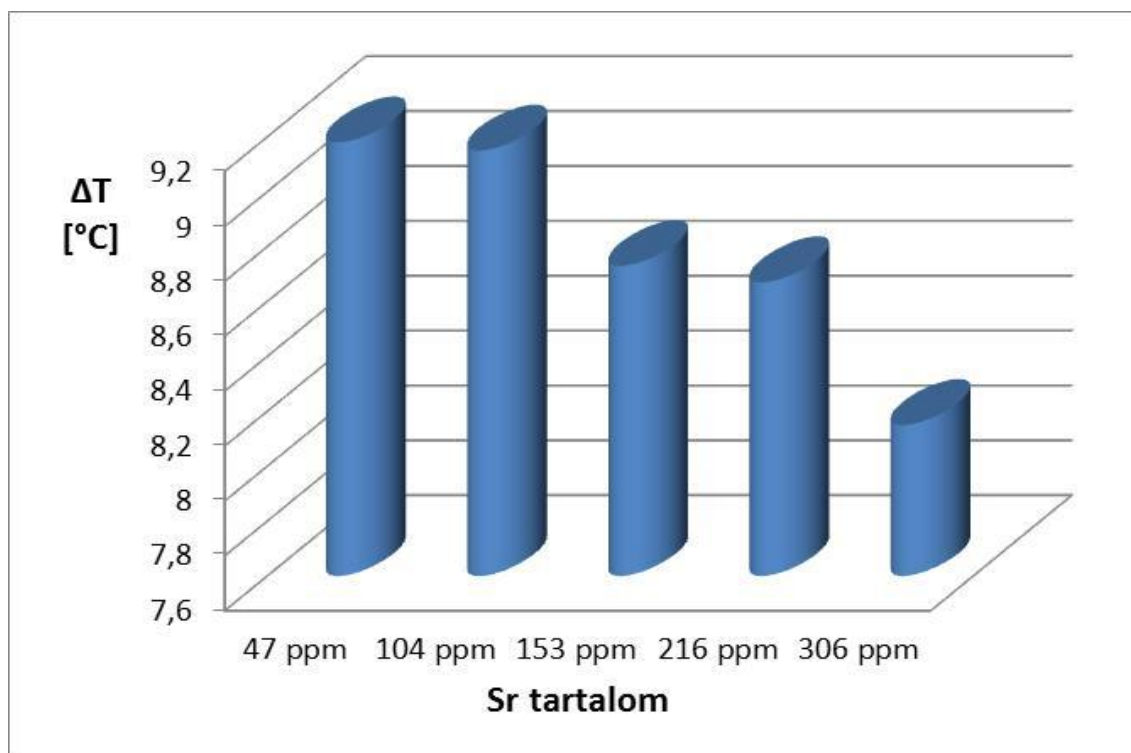
Telm.: elméleti eutektikus hőmérséklet

ΔT : eutektikus max. hőmérséklet és az elméleti eutektikus hőmérséklet közötti különbség

A kapott eredményeket kiértékelve megállapítható, hogy a nemesítés értéke 50 ppm és 100 ppm Sr tartalomnál a legmagasabb. 100 ppm Sr tartalom felett pedig egyértelmű csökkenés látható az eredményekben, tehát ennél az értéknél többlet Sr adagolása rontja a nemesítettséget. A termikus analízis során kapott lehülési görbéket a 24. ábrán szemléltettem. A ΔT értékeit a 25. ábrán ábrázoltam a jobb kiértékelhetőség végett.



24. ábra: A termikus analízis során kapott lehülési görbék



25. ábra: A ΔT változása a Sr-tartalom függvényében

4. ÖSSZEGZÉS

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy 100 ppm stroncium tartalomig az eutektikus Si nemesítettségi foka és a sűrűségindex is megfelelő értéket mutatnak.

20 ppm-nél kisebb stroncium-tartalom alulnemesítéshez vezethet, míg 100 ppm feletti stroncium-tartalom erősen növeli a gázfelvételt, ami a kész öntvény mechanikai tulajdonságait erősen leronthatja.

Fontos tehát, hogy a termikus analízis próbák mellett leöntött szakítópálcákon elvégezzük a mechanikai szilárdságok vizsgálatát, hogy a három mérés eredményeit összevetve tudjunk meghatározni egy optimális stroncium-tartalmat.

Köszönetnyilvánítás

A TDK dolgozatban bemutatott vizsgálatokat a Miskolci Egyetem Metallurgiai és Öntészeti Tanszék Műhelycsarnokában végeztem.

Ezúton mondok köszönetet a ME Metallurgiai és Öntészeti Tanszék munkatársainak a TDK dolgozat elkészítéséhez nyújtott segítségükért.

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Dúl Jenőnek, a Miskolci Egyetem docensének a TDK dolgozat elkészítéséhez nyújtott segítségért.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. Jónás Pál Könnyűfém öntészeti ismeretek tananyag, Miskolc 2011. p. 515-518, 552-564
- [2] L. Bäckerud, G. Chai and J. Tamminen; "Solidification Characteristics of Aluminum alloys", Volume 2, AFS/SKANALUMINIUM, Oslo, 1986, p. 95-105
- [3] Anna Szombatfalvy – Jenő Dúl: Optimizing the features of Al-melts of automotive industry casting. In: A Miskolci Egyetem Közleményei. 2. sorozat, Anyagmérnöki Tudományok. 2010. (Vol. 35.) No. 2. p. 75-84. ME-PUB-41368
- [4] Dúl Jenő – Gyurán László - Szombatfalvy Anna: Járműipari öntészeti alumínium-ötvözet olvadákok tulajdonságainak optimalizálása, - BKL Kohászat 2007, vol. 140, No. 3, p. 15-19
- [5] J. P. Anson, J. E. Gruzleski, M. Stucky - Sr-mal való módosítás hatása a mikroporozitás gócképződésére és növekedésére Al-7%Si öntődei ötvözet szilárdulási folyamata során McGill University; Montreal, Quebec, KANADA és Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF); Serves, FRANCIAORSZÁG (2003)
- [6] P. D. Lee és S. Sridhar†; † Department of Materials, Imperial College, London SW7 2BP, U.K.; ‡ Department of Materials Science and Engineering, Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA 15213, USA
- [7] <http://www.grimas.hu/hu/spektrometerek/Lapok/UzemiOptikaiSpektrmeterek.aspx>
- [8] M. Lebyodkin, A. Deschamps, Y. Bréchet: Materials Science and Engineering A 234-236, p.481-484. 1997
- [9] <http://www.mk-gmbh.de>