

MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
KERPÉLY ANTAL ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS
TECHNOLÓGIÁK DOKTORI ISKOLA



JÁRMŰIPARI ÖNTÉSZETI ALSI-ÖTVÖZETEK
TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA

PhD-értekezés

Készítette:

SZOMBATFALVY ANNA

okleveles kohómérnök

Tudományos vezető:

DR. DÚL JENŐ

egyetemi docens

Miskolc, 2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, a doktori munka célkitűzései	6
2. Az öntészeti alumínium-szilícium ötvözetek	8
2.1. Az öntészeti alumínium-szilícium ötvözetek tulajdonságai.....	8
2.2. Az alumínium-szilícium ötvözetek ötvözőelemei.....	9
2.3. A zárványosság és a porozitás keletkezésének okai.....	17
2.3.1. A hidrogéngáz forrásai az alumíniumolvadékokban.....	19
2.3.2. Az alumíniumolvadékok hidrogéntartalmának csökkentésére alkalmazott módszerek.....	21
2.3.3. Az alumíniumolvadékok gáztartalmának meghatározása	24
2.4. Nemfémes zárványok az alumíniumolvadékban.....	25
2.5. Kölcsönhatás az olvadék oxid- és a hidrogéntartalma között.....	28
3. Járműipari öntészeti alumínium-szilícium olvadékok oldott gáztartalmának és zárványosságának vizsgálata	29
3.1. Kísérleti körülmények.....	30
3.1.1. A vizsgált ötvözetek bemutatása	30
3.1.2. Olvasztás és olvadékkezelés	31
3.1.3. A gázokkal történő fémtisztítás berendezései.....	31
3.1.4. Vizsgálati módszerek és berendezéseik.....	35
3.1.5. Az alumíniumolvadékok zárványtartalmának vizsgálata Prefil berendezéssel	38
3.2. A sűrűség-index és az oldott hidrogén-tartalom közötti összefüggés vizsgálata és a vizsgálatok eredményei	40
3.2.1. Az alumínium-szilícium olvadékok hidrogéntartalmának vizsgálata a metallurgiai fázisban	40
3.2.2. A hőtartó kemencében tárolt olvadék hidrogéntartalmának vizsgálata.....	43
3.3. A rotoros gáztalanítás hatékonyságának vizsgálata	47
3.3.1. Különböző rotorokkal végzett gáztalanítási kísérletek eredményei az ötvözettől függetlenül	47
3.3.2. A rotoros gáztalanítás paramétereinek hatása különböző ötvözetek olvadékának minőségére.....	55
3.4. A gáztalanító kezelés hatása az olvadék zárványtartalmára	63
3.4.1. A 200-250 ppm stronciumot tartalmazó AlSi8Cu3 ötvözzel végzett mérések.....	63
3.4.2. A 80 ppm stronciumot tartalmazó AlSi5Cu3 ötvözzel végzett mérések eredményei	70
3.4.3. Az 1200 ppm antimont tartalmazó AlSi7Mg ötvözzel végzett mérések eredményei	71
3.4.4. Az 1200 ppm antimont tartalmazó AlSi7Mg ötvözzel végzett mérések eredményei argonnal történő gáztalanítás esetén	73
3.4.5. A sűrűségindex és a Prefil-készülékkel mért átfolyási tulajdonságok közötti összefüggések vizsgálata AlSi7Mg és AlSi5Cu3 ötvözetek esetén	75
3.4.6. Elektronmikroszkópos (REM) és mikroszondás (SEM) vizsgálati eredmények	77
3.4.7. A vizsgálati eredmények termodinamikai magyarázata	83
4. Összefoglalás	87
5. Summary	90
6. Új tudományos eredmények	92
7. Köszönetnyilvánítás	95
8. Irodalomjegyzék.....	96
9. Az értekezés témaköréből megjelent saját publikációk	101

Ábrajegyzék

1. ábra. Az alumínium-szilícium ötvözetek fázisdiagramja	10
2. ábra. Az alumínium-szilícium ötvözetek szövetei	10
3. ábra. A szilícium hatása a sziluminok mechanikai tulajdonságaira [5]	11
4. ábra. A bór használatának előnye a szemcsefinomításban [3].....	12
5. ábra. A mechanikai tulajdonságokkal összefüggő minőségi index és az oldó hőkezelés időtartamának kapcsolata az A356-os típusú ötvözetek és T6 hőkezelés esetén [10]..	13
6. ábra. A minőségi index változása az oldó hőkezelés időtartamának függvényében a stronciummal való módosítás hatására az A359-es típusú ötvözet esetén, T4 hőkezelést követően [11]	14
7. ábra. A stroncium és az antimón együttes hatása a primer szilícium morfológiájára A356-os ötvözetben [16]	15
8. ábra. A hidrogén és a nemfémes szennyezők közötti kölcsönhatás, és hatásuk az anyagi tulajdonságokra.....	18
9. ábra. A különböző összetételű alumínium-szilícium ötvözetekben oldódó hidrogén mennyisége [9]	20
10. ábra. A szilárdsági paraméterek javítási lehetőségei	25
11. ábra. A minőségi index kapcsolata az olvadáskínáltsággal és a mechanikai tulajdonságokkal	26
12. ábra. Különböző típusú és geometriájú rotorok.....	32
13. ábra. A rotoros gáztalanító berendezés sematikus ábrázolása	33
14. ábra. Az olvadékfelszín jellemző képei a szokásos üzemi alapérték százalékában megadott fordulatszám (n) és gázáram (V) beállítások mellett [20]	34
15. ábra. Forgó rotorról leváló buborék kritikus sugara a rotor fordulatszámának és a gáz térfogatáramának a függvényében (gáz térfogatáramának értékei alulról felfelé haladva a görbéken: 10, 100, 1000, 3000 és 10000 cm ³ /s) [70].....	35
16. ábra. A sűrűségindex meghatározására szolgáló berendezés, illetve a levegőn és a vákuumban megszilárdult próbatestek metszeteikkel	36
17. ábra. Alspek H hidrogénszenzor [13], [22].....	37
18. ábra. A Prefil készülék és egy kiértékelő diagram	38
19. ábra. Az oldott hidrogéntartalom változása gáztalanító kezelés és felgázosítás közben Alspek H hidrogénszenzorral mérve	40
20. ábra. AlSi7Mg(Sb) ötvözetből gáztalanítás előtt és után vett minta csiszolatának makroszkópikus felvétele	41
21. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változása gáztalanító kezelés hatására.	42
22. ábra. Gáztalanítás nélküli olvadék utánöntésének hatása az oldott hidrogéntartalomra	44
23. ábra. A formálógáz- és a stronciumadagolás hatása	45
24. ábra. A formálógáz adagolásának hatása	46
25. ábra. A vizsgált rotorfejek képei	47
26. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom értékei olvadékkezelés előtt és után a vizsgált ötvözetek esetén	50
27. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom különbsége az olvadékkezelés előtt és után a vizsgált ötvözetek esetén	51
28. ábra. A „C” rotorral végzett gáztalanítás során kapott eredmények olvadékkezelés előtt és után.....	51
29. ábra. A „B” rotorral végzett gáztalanítás során kapott eredmények olvadékkezelés előtt és után.....	52

30. ábra. Az „A” rotorral végzett gáztalanítás során kapott eredmények olvadékkezelés előtt és után.....	52
31. ábra. Az oldott hidrogéntartalom átlagértékei olvadékkezelés előtt és után.....	53
32. ábra. A sűrűségindex mérések átlagértékei olvadékkezelés előtt és után.....	54
33. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom relatív változása a gáztalanító kezelés előtti és utáni értékek különbsége alapján	55
34. ábra. A sűrűségindex változása kezelés előtt és után AlSi10Mg ötvözet esetén	56
35. ábra. Az oldott hidrogén változása kezelés előtt és után AlSi10Mg ötvözet esetén.....	57
36. ábra. A sűrűségindex változása kezelés előtt és után AlSi8Cu3 ötvözet esetén	58
37. ábra. Az oldott hidrogén változása kezelés előtt és után AlSi8Cu3 ötvözet esetén.....	58
38. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogén mérési eredmények különbségének a kezdeti értékhez viszonyított aránya AlSi10Mg jelű ötvözet esetén.....	59
39. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogén mérési eredmények különbségének a kezdeti értékhez viszonyított aránya AlSi8Cu3 ötvözet esetén.....	60
40. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom gáztalanító kezelés közben elért különbsége a kezelés előtti érték százalékában.....	61
41. ábra. A 4.3, 4.4 és 4.5 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi.....	66
42. ábra. A 4.6, 4.7 és 4.8 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi.....	66
43. ábra. A 4.9, 4.10 és 4.11 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi.....	67
44. ábra. A 4.15, 4.16 és 4.17 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi.....	67
45. ábra. A sűrűségindex és az olvadékkezelés összefüggése	68
46. ábra. A Prefil-készülékkel mért átfolyási viszonyok változása a gáztalanító kezelés hatására	68
47. ábra. A Prefil-készülékkel mért átlagos átfolyási sebesség és az olvadékkezelés összefüggése	69
48. ábra. A 7.1, 7.2 és 7.3 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi.....	71
49. ábra. Az 5.1 és 5.2 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi	72
50. ábra. Az 5.7 és 5.8 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi	73
51. ábra. Átfolyási sebesség argonos gáztalanítás hatására	74
52. ábra. Különböző ötvözetekhez és eltérő módosító anyag alkalmazásához tartozó sűrűségindex eredmények	75
53. ábra. Különböző ötvözetekhez és eltérő módosító anyag alkalmazásához tartozó Prefil-eredmények.....	76
54. ábra. AlSi5Cu3 (80 ppm stroncium) ötvözetből az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba elektronmikroszkópos felvételei.....	78
55. ábra. AlSi5Cu3 ötvözetből az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba mikroszondás eredményei	79
56. ábra. AlSi7Mg ötvözetből az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba elektronmikroszkópos felvételei	80
57. ábra. AlSi7Mg ötvözetből az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba mikroszondás eredményei.....	81
58. ábra - Prefil-készülékkel nyert próba elektronmikroszkópos felvétele AlSi7Mg (1200 ppm stroncium) ötvözet esetén nitrogénes és argonos gáztalanítást követően.....	82
59. ábra. Mg ₃ Sb ₂ intermetallikus fázisok a vizsgált szövetképeken	86

Táblázatok

1. táblázat.	Az öntészeti alumínium-szilícium ötvözetekben található elemek csoportosítása ..	9
2. táblázat.	Áttekintés az alumíniumöntvényekben található nemfémes zárványokról	27
3. táblázat.	A vizsgált ötvözetek elemeinek alsó és felső határértékei (tömeg %)	30
4. táblázat.	Az olvadék gáztartalmának vizsgálata az olvasztás metallurgiai fázisában	41
5. táblázat.	A hőntartó kemencében tárolt AlSi7Mg(Sb) ötvözet oldott hidrogéntartalma Alspek H készülékkel mérve, és a sűrűségindex vizsgálata	44
6. táblázat.	Az AlSi8Cu3 (319) ötvözet oldott hidrogéntartalmának mérési eredményei	48
7. táblázat.	Az AlSi9Cu3 (226.10) ötvözet oldott hidrogéntartalmának mérési eredményei	49
8. táblázat.	Az AlSi10Mg (233) ötvözet oldott hidrogéntartalmának mérési eredményei	49
9. táblázat.	Az Alspek H hidrogénszenzorral mért oldott hidrogéntartalmak átlagértékei	53
10. táblázat.	A sűrűségindex mérések átlagértékei	54
11. táblázat.	A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változása a gáztalanító kezelés közben, a kezelés előtti és utáni értékek és a különbségük	55
12. táblázat.	A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változása a gáztalanító kezelés közben, a kezelés előtti és utáni értékek és a különbségük AlSi10Mg ötvözet esetén	56
13. táblázat.	A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változása a gáztalanító kezelés közben, a kezelés előtti és utáni értékek és a különbségük AlSi8Cu3 ötvözet esetén	57
14. táblázat.	Hőntartó kemencéből vett AlSi8Cu3 ötvözet Prefil-készülékkel végzett vizsgálata	65
15. táblázat.	A kihordó üstből és hőntartó kemencéből Prefil-készülékkel nyert minták-eredményei AlSi5Cu3 ötvözet esetében	70
16. táblázat.	A kihordó üstből és hőntartó kemencéből Prefil-készülékkel nyert minták-eredményei AlSi7Mg ötvözet esetében	72
17. táblázat.	Az AlSi7Mg ötvözet Prefil-készülékkel kapott eredményei argonos gáztalanítás esetén	74
18. táblázat.	A binér kölcsönhatások [74]	83

1. Bevezetés, a doktori munka célkitűzései

Napjainkban, amikor több millió személyautót, motorkerékpárt gyártanak évente, és a környezetvédelmi előírások szigorítása a konstruktőröket komoly kihívások elé állítja, minden olyan téma rendkívül aktuális, mely járműipari öntvényekkel, illetve ezen öntvények gyártástechnológiájának felülvizsgálatával, fejlesztésével foglalkozik. A gyártástechnológia megalkotása során törekedni kell a költség- és környezethatékony megoldásokra. Az autóipari beszállítóknak egyre inkább szembe kell nézniük azzal a ténnyel, hogy az autógyárak elsődleges célja a minél nagyobb teljesítményű, de minél kisebb tömegű alkatrészek kifejlesztése. Ebbe a körbe taroznak a gépjárművek alumíniumöntvözetből kokillába öntött, biztonsági szempontból fontos alkatrészei, pl. a fékházak, főfékhengerek, lengőkarok, felfüggesztők stb.

A járműipari alkatrész-előállítás területén csúcstechnológiai szintű gyártás folyik. A járműipari biztonsági alkatrészek öntvényeivel szemben támasztott követelmények igen szigorúak, azoknak belső folytonossági hibáktól, gázporozitástól, fogyási üregtől és lunkertől mentesnek kell lenniük, emellett kimagasló szilárdsági tulajdonságokkal kell rendelkezniük. A kimagasló szilárdsági követelmények teljesítéséhez azonban folyamatos technológiai fejlesztés, magas szintű gyártási fegyelem szükséges. Az alumíniumöntvözetekből kokillába öntött biztonsági öntvények inhomogén szövetszerkezetűek, szilárdsági tulajdonságaik a kristályosodás közben kialakult szemcsék méretétől, eloszlásától, valamint a folytonossági hibának számító gáz- és nemfémes zárványok szilárdságcsökkentő hatásától függenek. Tapasztalatok szerint az öntvényekben előforduló zárványok kialakulása vagy a porozitásképződési hajlam összefügg az olvadékok szennyezőelem tartalmával. Az üzemi gyakorlat a szennyezőelemek szabvány által előírt határértékeinek betartását követeli meg, ugyanakkor az alapanyagok előállítási technológiájától függően nagy eltérések tapasztalhatók ezen elemek előfordulásában.

A disszertációm célja az öntészeti alumínium-szilícium olvadékok gáztartalmának és zárványtartalmának vizsgálata, a vizsgálati módszerek áttekintése és az öntödei körülmények közötti technológiai hatások kimutatása. Mivel a zárványtartalom a tapasztalatok szerint összefügg az olvadékok gáztalanító és szerkezetfinomító kezelésével, a vizsgálataim ezek hatásainak kimutatására és a zárványtartalom csökkentésének lehetőségeire is irányultak.

Kísérleti munkám első részében a járműipari öntészeti alumínium-szilícium olvadékok oldott hidrogéngáz tartalmát vizsgáltam a Foseco cég által kifejlesztett Alspek H nevű hidrogénszenzorral, illetve egy, az ún. sűrűségindexet meghatározó berendezéssel. A két mérési módszer eredményei között összefüggéseket kerestem; valamint célom volt a berendezések előnyeinek és hátrányainak megismerése, gyakorlati alkalmazásuk indokoltságának bemutatása és ez által a gyártási biztonság növelése, a selejt csökkentése.

A kísérleti munka további célja volt, hogy vizsgáljam a rotoros gáztalanítás zárványcsökkentő hatását, és összefüggéseket állapítsak meg az olvadékok gáztalanító kezelésével elérhető hidrogéntartalom, sűrűségi index és az öntvényhibák között. Az olvadékok gáztalanító kezelése és a Prefil-berendezéssel végzett szűréses zárványtartalom vizsgálatok mérési eredményeinek összehasonlító kiértékelése különböző technológiai körülmények esetén nem csak az olvadékkezelés optimalizálását segítették elő, hanem új összefüggések megállapítását is lehetővé tették.

2. Az öntészeti alumínium-szilícium ötvözetek

A doktori kutatómunkámban öntészeti alumínium-szilícium ötvözetekkel, ezen belül is járműipari öntészeti ötvözetekkel foglalkoztam. A kutatómunka kísérleti részét két, járműipari öntvényeket gyártó öntödében végeztem el, ezért a 2. fejezetben ezen ötvözetek öntészeti tulajdonságait foglalom össze részletesen.

2.1. Az öntészeti alumínium-szilícium ötvözetek tulajdonságai

Az alumínium tulajdonságait ötvözők bevitelével javítjuk. Főötvözőnek azokat az ötvözőket tekintjük, amelyek alapvetően megváltoztatják az öntészeti ötvözetek szilárdsági és egyéb tulajdonságait. Főötvöző alapvetően a szilícium, a réz, a magnézium és a cink stb. Minden esetben, amikor közülük egy-egy a legnagyobb mennyiségben szerepel az alumínium mellett, különböztetjük meg

- az alumínium-szilícium;
- az alumínium-réz;
- az alumínium-magnézium;
- az alumínium-cink bázisú és a többi ötvözetet.

Az alumínium-szilícium ötvözetek (sziluminok) a legelterjedtebbek az öntészeti ötvözetek között, mert alacsony az olvadási és öntési hőmérsékletük, illetve kiváló a formakitöltő képességük. Az öntvénytermelésben való nagy elterjedésük oka, hogy ennek az ötvözetcsaládnak a legkedvezőbbek az öntéstechnológiai tulajdonságai, mert a szilícium az alumíniumban korlátozottan, szobahőmérsékleten alig oldódik, eutektikumot képez. A szilícium különböző aránya esetén sokféle előnyös tulajdonság érhető el. Feltalálója, *Patz Aladár* [5] után Alpatznak is nevezik, de hazánkban a szilumin elnevezés terjedt el. Az eutektikum szövete – modifikálás nélkül – durva, lemezes szerkezetű, amelynek rossz szívóssági és alakváltozási tulajdonságai vannak. A módosítás hatására a dermedés során finom, gömb alakú szilícium kristályok alakulnak ki. Ez egyidejűleg növeli az ötvözet szilárdságát és alakváltozó képességét is.

2.2. Az alumínium-szilícium ötvözetek ötvözőelemei

Öntészeti alumínium-szilícium ötvözetek ötvözőelemeinek vagy szennyezőinek felsorolásakor figyelembe kell venni, hogy az egyes elemek hatása nem minden esetben egyértelmű, mert pl. egy adott elem az egyik ötvözetben lehet minőségjavító elem, ugyanakkor egy másik ötvözetben már szennyezőnek minősül (pl. a hipoeutektikus és az eutektikus alumínium-szilícium ötvözetek esetén a nátrium minőségjavító elemként szerepel, míg az alumínium-magnézium bázisú ötvözetekben már káros szennyező, mert ridegséget okoz, de a hipereutektikus összetételű sziluminok esetén is szennyező elem, mert a foszforral reakcióba lépve csökkenti a foszforral végzett szemcsefinomítás hatékonyságát). Az 1. táblázatban az öntészeti alumínium-szilícium ötvözetekben található elemek szerepelnek.

1. táblázat. Az öntészeti alumínium-szilícium ötvözetekben található elemek csoportosítása

I. Főötvöző	Si
II. Másodrendű ötvözők	Cu, Mg, Zn, Mn, Ni, Co
III. Minőségjavító ötvözők (olvadékkezelés)	Ti, B, Na, Sr, Sb, P, Zr, Li
IV. Szennyezők	Fe, Mn, Cr (iszapképzők), Bi, Ca, Cd, Pb, Sn

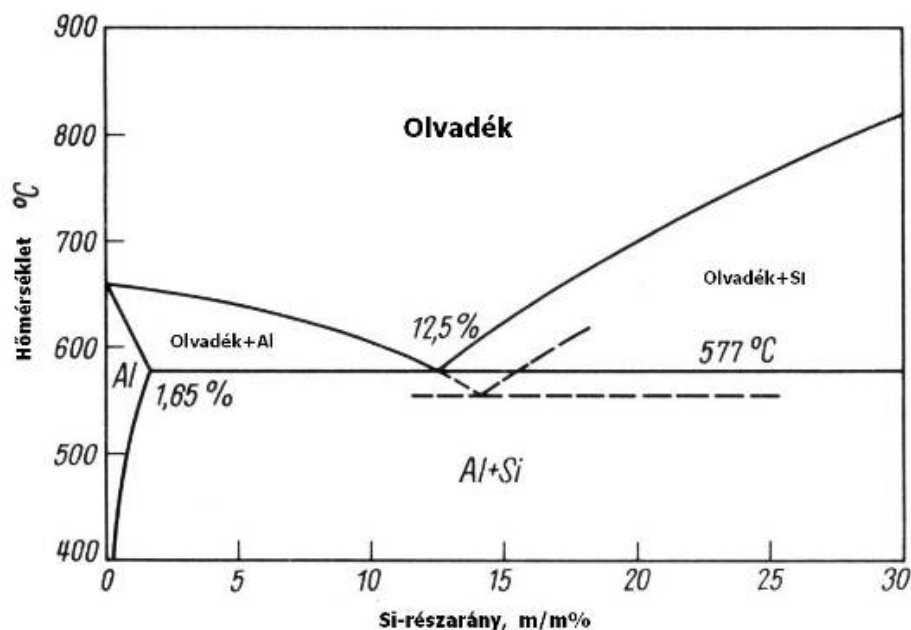
A következőkben azon fontos ötvözőelemeket mutatom be, amelyek a kutatómunkám során vizsgált ötvözetek minőségét jelentős mértékben befolyásolták és a kapott kutatási eredményekre hatással voltak.

Szilícium

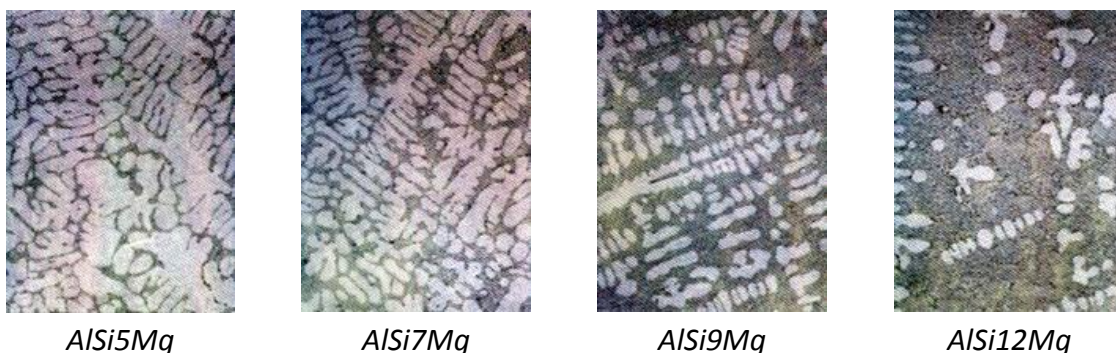
A szilícium a legelterjedtebb ötvözőelem az öntészeti ötvözetekben. Megkülönböztetünk:

- hipoeutektikus ötvözeteket, általában 5,2–11% szilíciumtartalommal;
- eutektikus ötvözeteket, 12–13% szilíciumtartalommal és
- hipereutektikus ötvözetek, 13–25% szilíciumtartalommal.

Az 1. ábrán az alumínium-szilícium ötvözetrendszer kétalkotós állapotábráját a 2. ábrán pedig a különböző öntészeti ötvözetek szövetét mutatom be.

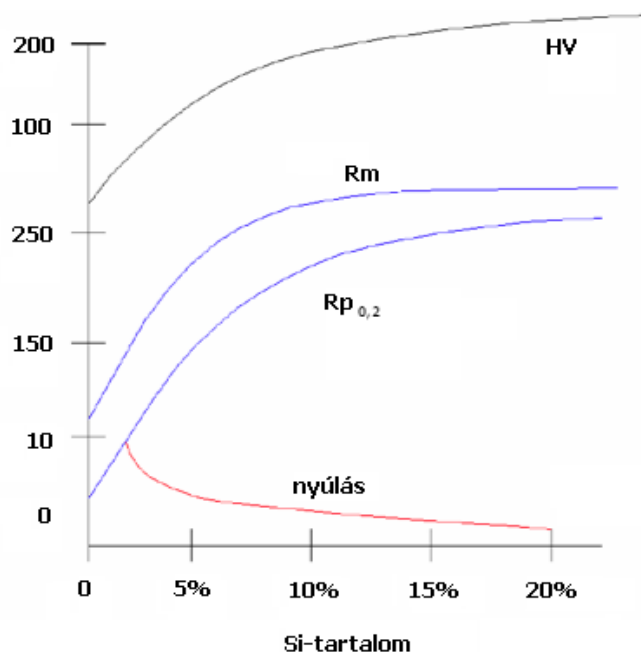


1. ábra. Az alumínium-szilícium ötvözetek fázisdiagramja



2. ábra. Az alumínium-szilícium ötvözetek szövetképei

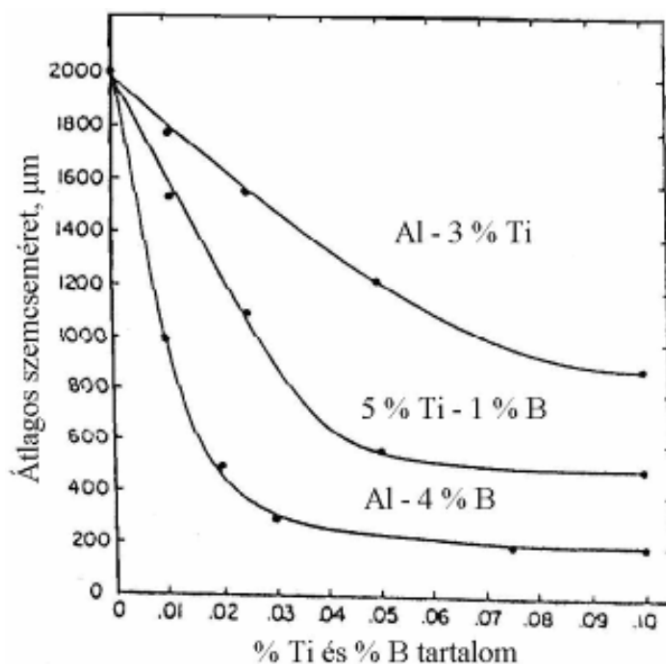
A kereskedelembe kapható öntészeti alumíniumötvözetek teljes sora tartalmaz szilíciumot rézzel és/vagy magnéziummal. Kis mennyiségű magnézium adagolása néhány szilíciumtartalmú ötvözethez lehetővé teszi a hőkezelést, de ennek az ellenkezője nem igaz, ha a magnézium meghaladja az Mg_2Si létrehozásához szükséges mennyiséget, akkor a felesleg élesen csökkenti a szilárd állapotban való oldhatóságát ennek az összetevőnek. Az alumínium-szilícium öntészeti ötvözetek mechanikai tulajdonságait javítja a módosítás. A nagyobb hűlési sebességet biztosító kokilla, mint öntőforma, ugyanezt eredményezi az eutektikus szilícium finomításával. A 3. ábrán azt mutatom be, hogyan befolyásolja a szilíciumtartalom az alumíniumötvözetek mechanikai tulajdonságait.



3. ábra. A szilícium hatása a sziluminok mechanikai tulajdonságaira [5]

Titán és bór

A kereskedelmi tisztaságú alumíniumban 10–100 ppm mennyiségű titán található. A titán rontja az alumínium elektromos vezetőképességét, de ez a hatás kiküszöbölhető, ha az olvadékhoz bórt adagolnak, mivel ez így oldhatatlan fázist (TiB_2) alkot. A titánt elsősorban szemcsefinomítóként használják az alumíniumötvözetekben, ez a hatása bór hozzáadásával még növelhető. Önmagában vagy TiB_2 -dal együtt adagolják öntés során. A 4. ábra a bór használatának előnyét mutatja be a szemcsefinomításban, azaz az adagolt bór mennyiségének függvényében kialakuló átlagos szemcseméretet.



4. ábra. A bór használatának előnye a szemcsefinomításban [3]

A bór az alumínium-szilícium ötvözetekben AlB_2 -t képez, ami hatékony csíráképző az öntészeti ötvözetekben, ugyanakkor SrB_6 -ot is képez. Így a bór zavarja a stronciummal való módosítást. Emiatt a szemcsefinomítás legjobb kiegészítője a hozzáadott TiB_2 az Al-Ti-B ötvözeteken keresztül.

Az idegen anyaggal történő szemcsefinomítás a legszélesebb körben elterjedt és legüzembiztosabb eljárás. A kezelés során a hatékony csírák segédötvözetekből vagy sópreparátumokból juthatnak az olvadékba. Kezdetben a szemcsefinomító adalékok, közismert nevükön sók, titán- és bórvegyületeket tartalmaztak, napjainkban viszont már alumíniumalapú segéd- vagy mesterötvözeteket alkalmaznak alumínium-titán és alumínium-titán-bór ötvözetek formájában. Ez a váltás azért következett be, mert a vegyületalapú termékek szemcsefinomító képességének határfoka csekély, és idővel a finomszemcsészetű, módosított termékekkel szemben nőttek az igények [1].

Stroncium

A kereskedelmi tisztaságú alumíniumban a stroncium nyomokban fordul elő (0,01–0,1 ppm). Legtöbbször nátrium helyett használják az alumínium-szilícium öntészeti ötvözetek módosítására.

Az alumínium-szilícium ötvözetekhez stronciumot elsősorban a nagy acikuláris eutektikus szilíciumrészecskék morfológiájának módosítása miatt adagolunk, hogy ezeket

finomabb méretűvé és szálas szerkezetűvé alakítsuk. Ez a változás hatással van a hajlíthatóságra és a szilárdságra is, végül pedig a minőségi indexre. Az ötvözet tulajdonságainak megállapítására a szakirodalom az úgynevezett minőségi indexet ajánlja, amely az ötvözetek mechanikai tulajdonságait foglalja össze.

A minőségi vagy quality index meghatározása:

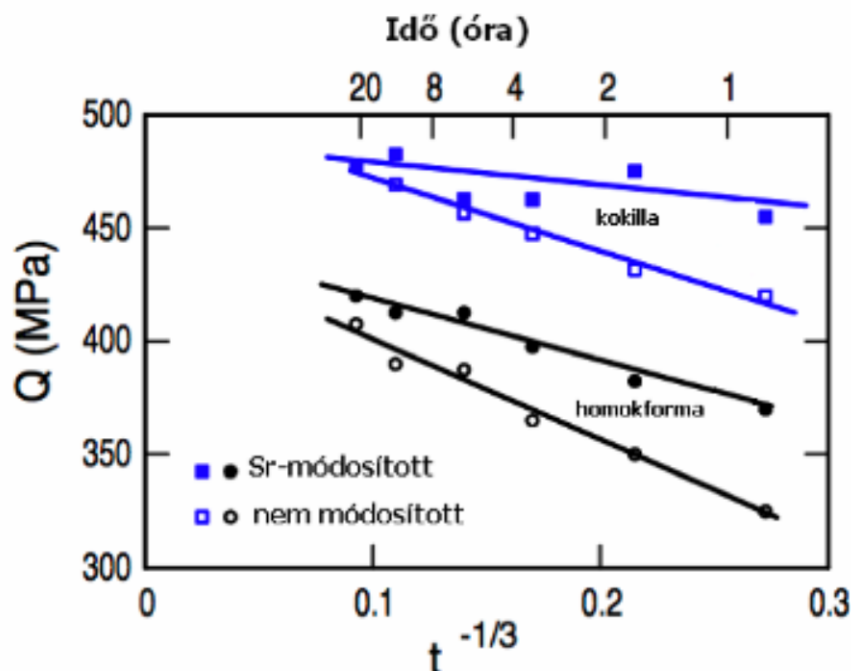
$$Q = R_m + k \cdot \log A \quad (1)$$

ahol:

- R_m a szakítószilárdság; N/mm^2
- A a szakadási nyúlás vagy teljes nyúlás; %
- k konstans (ötvözetfüggő)

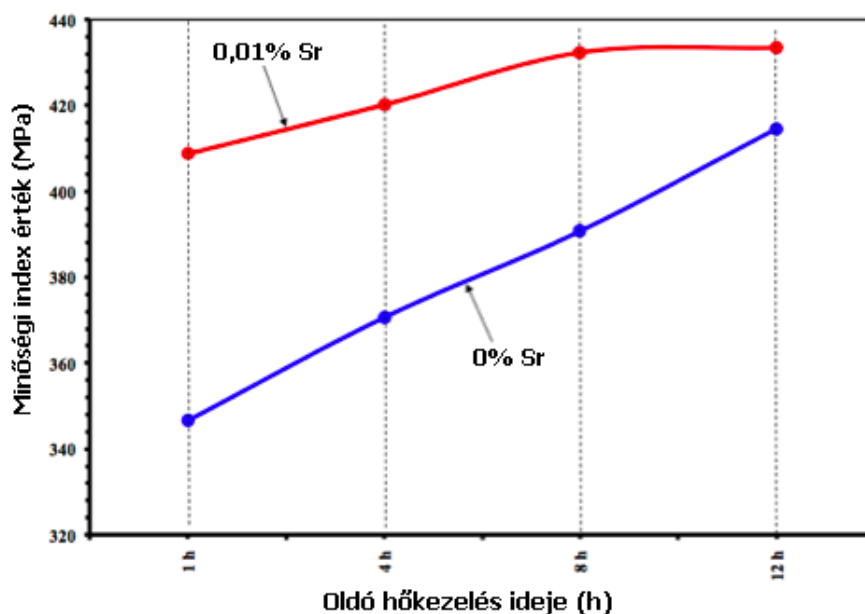
A hőkezelt alumínium-szilícium ötvözetek mechanikai tulajdonságai erősen függenek a szilíciumkristályok méretétől és alakjától. A stroncium az egyik olyan ötvözőelem, amit azért adagolnak ezekhez az ötvözetekhez, hogy a szilíciumfázist finomítsák, ezáltal javítsák a maradó alakváltozó képességet. Emellett a T6 hőkezelés időigénye is fontos: annál az alumínium-szilícium ötvözetnél, amelyet nátriummal vagy stronciummal módosítottak, az oldó hőkezelés ideje lényegesen lecsökkenthető (8 helyett 4 óra).

A minőségi index és a hőkezelési idő kapcsolatát mutatja be az 5. ábra.



5. ábra. A mechanikai tulajdonságokkal összefüggő minőségi index és az oldó hőkezelés időtartamának kapcsolata az A356-os típusú ötvözetek és T6 hőkezelés esetén [10]

Stroncium adagolásával az eutektikus szilíciumrészecskék módosíthatóak, a porozitás szintje és mérete is csökkenthető, és csökken az intermetallikus fázisok mérete és mennyisége is. A stronciummal módosított ötvözetek oldó hőkezelésének ideje lerövidíthető a nem módosított ötvözetekéhez képest (6. ábra).



6. ábra. A minőségi index változása az oldó hőkezelés időtartamának függvényében a stronciummal való módosítás hatására az A359-es típusú ötvözet esetén, T4 hőkezelést követően [11]

A 6. ábra bemutatja, hogy a hőkezelési idő növelése a módosított és nem módosított 359-es ötvözetek minőségi indexei közti különbséget csökkenti, tehát a stronciummal való módosítás hatékonyabb a rövidebb idejű kezelések alatt.

Antimon

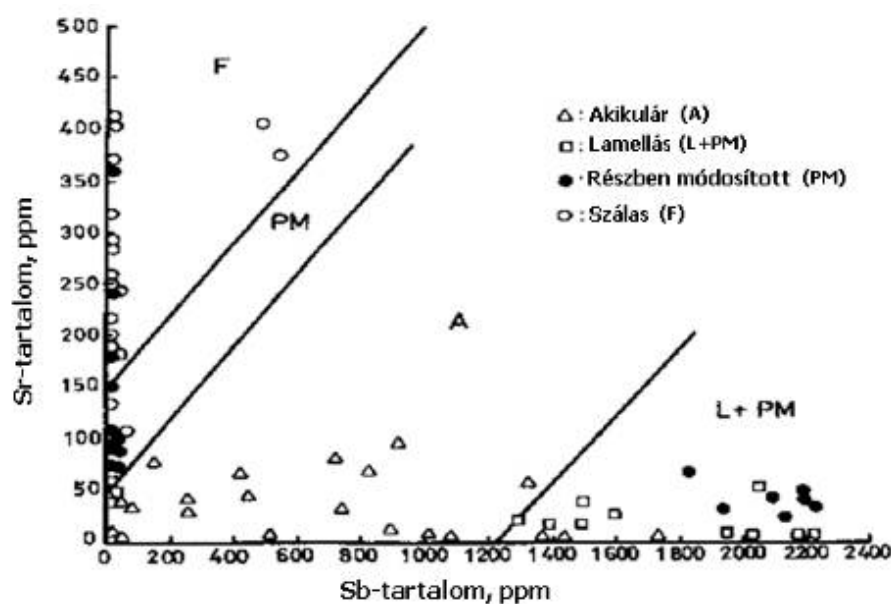
Az antimon nyomokban fordul elő a primer kereskedelmi alumíniumban (0,01–0,1 ppm). Oldhatósága a szilárd alumíniumban nagyon kicsi: <0,01%. A hipereutektikus alumínium-szilícium öntészeti ötvözetekben az antimon gátolja a primer szilícium csíráképződését, ezért az öntészeti ötvözetekben 0,05–0,2% mennyiségben az eutektikus szilícium finomítására használják. A nátrium vagy a stroncium adagolásakor tapasztaltakkal ellentétben az antimon nem „ég le” a hőntartás vagy az újraolvasztás során [1]. Az antimon nehézfém, ez komoly egészségügyi kockázatot jelent az öntödékben az ezzel a fémrel dolgozók számára. Emiatt manapság már csak nagyon ritkán használják.

Az antimon hosszú idejű módosító hatását vizsgálták az alumínium-szilícium ötvözetek hűntartása közben. 120 perc után ugyanolyan antimontartalom értéket kaptak, mint a rövidebb hűntartási időnél (5 perc) [12].

Az antimon a folyékony alumínium-szilícium ötvözetekben elősegíti a szilícium atomok egyesülését és a csíráképződést, csökkenti a kristályosodás során a túlhűlést, és végül módosítja a primer szilíciumkristályok méretét és alakját a szilárd fázisban [1].

Az antimon adagolásán alapuló eljárásokat a Pacz-féle nátriumos módosítás után fejlesztették ki, hogy csökkentsék a gázfelvevő képességet. Az antimonos technológia az autóiparban alkalmazott öntvényeknél terjedt el leginkább. Eltérően a nátriummal és a stronciummal módosított öntvényektől, az antimonnal kezelt öntvények tulajdonságai nem függenek az olyan tényezőktől, mint a hűntartási idő, az újraolvasztás vagy a gáztalanítás.

A stroncium és az antimon együttes hatása is leginkább a primer szilícium szerkezetével kapcsolatban figyelhető meg. Az antimon káros hatása a legtöbb esetben ellensúlyozható a stronciumszint növelésével. A 7. ábra mutatja, hogy a stronciumtartalom növelése alacsony antimontartalom mellett a szálas (F) szilíciumszerkezetnek kedvez, míg egyre több antimon hatására inkább lamellás (L+PM) és részben módosított (PM) szerkezet alakul ki. Viszonylag kicsi stroncium- és antimontartalom mellett pedig leginkább acikulár (A-módosítatlan) szerkezet jön létre. Ezek a vizsgálatok A356-os típusú ötvözet esetében készültek.



7. ábra. A stroncium és az antimon együttes hatása a primer szilícium morfológiájára A356-os ötvözetben [16]

Több kutató is megállapította, hogy az antimon rontja a stroncium és a nátrium módosító hatását [21]. További hátrányként említhető, hogy az antimon visszamarad a hulladékciklusban, nem lehet eltávolítani sem oxidációval, sem oxigén és klór segítségével.

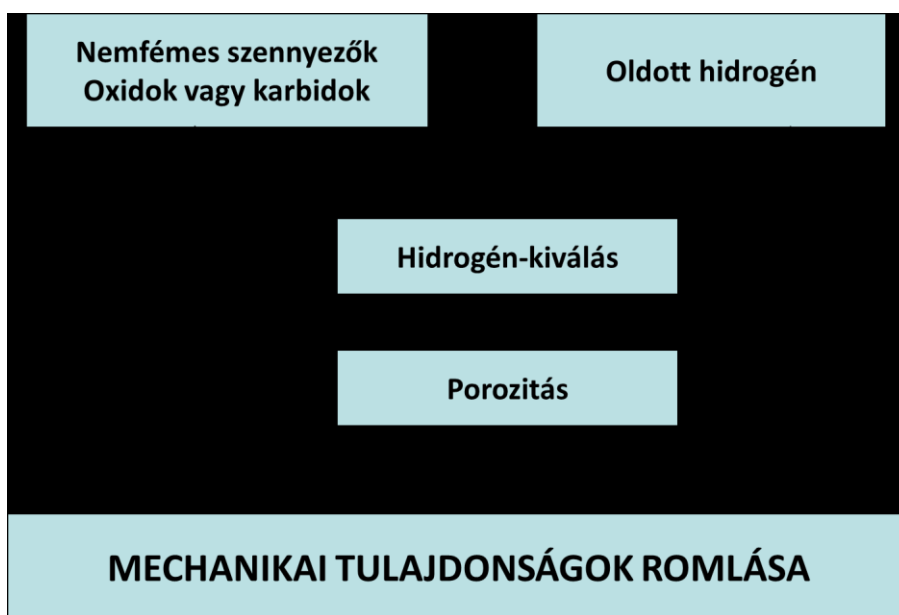
2.3. A zárványosság és a porozitás keletkezésének okai

Az öntészeti alumíniumötvözetekből gyártott, magas minőségi követelményeket kielégítő, dinamikusan terhelhető alkatrészek előállításának előfeltétele az olyan olvadékmellurgia, amely a hidrogén eltávolítása mellett a nemfémes szennyeződések eltávolítását is biztosítja. Ezek a nemfémes szennyezők jellemzően oxidok, nitridek és más intermetallikus fázisok, melyek később önálló fázisként jelentkeznek és így a fémes szövet homogenitását károsítják. Az oxidok negatív hatásának, de legfőképpen a finom oxidhártyáknak az öntvények külső bemetszési érzékenységre gyakorolt hatása következtében az alkatrészek szilárdsága jelentősen lecsökken. A nemfémes zárványok és szennyezők a szilárdság mellett erősen csökkentik az egyezményes folyáshatárt is. Ez különösen a vékonyfalú részekre igaz. Ahhoz, hogy az öntvényekkel szemben támasztott magas minőségi követelmények teljesüljenek, elengedhetetlen, hogy a szennyeződések olvadékba, a későbbiekben pedig az öntvényekbe jutását megakadályozzuk. Ehhez kívánalom az olvadék minőségének biztos megítélése az öntés előtt.

Az öntödék jelentős mennyiségű primer és szekunder nyersanyagot, illetve ötvözőket, mesterötvözeteket és más segédanyagokat használnak. A hulladék használata ill. visszajáratása fontos pótlólagos fémforrást jelent, ugyanakkor növeli az öntésre kerülő olvadék szennyezettségét. Az öntvények minősége közvetlenül függ az olvadék minőségétől. Az olvadék minőségének átfogó értelmezése alapvető fontosságú ahhoz, hogy a tényleges öntvény jellemzőit kontrollálni és előre jelezni tudjuk. Minden szennyező, ami az olvasztási szakaszban bekerül az olvadékba, bekerül a végső szövetszerkezetbe is, és természetesen befolyásolja az öntvény minőségét. Ezért nyilvánvaló, hogy az öntött termékek minőségellenőrzése az olvadék minőségének ellenőrzésével és kézben tartásával kezdődik, így az olvadéktisztítás hatékonysága egyre fontosabb igény [81].

A gyakorlatban a magas terheltségű öntvények előállításához olyan olvadékezelési eljárásokat alkalmaznak, mint pl. az impelleres (vagy rotoros) kezelés inert gáz bevezetésével kombinálva és az olvadék szűrése, hogy a folyékony fémet gáztalanítsák, az oxidokat, nitrideket és más intermetallikus fázisokat eltávolítsák, azaz az olvadékot tisztítsák. A gyakorlatban alkalmazott módszerek segítségével az olvadék teljes zárványmentessége nem érhető el, ezért ezen tisztítási eljárások hatásfokának megítélése és ellenőrzése alig lehetséges.

Az alumíniumolvadékok oxid- és zárványtartalmát elsősorban a nyersanyag kiválasztása dönti el. Az öntődei körforgásban résztvevő hulladékfém beolvasztása költségtakarékos, de egyben növeli az oxidtartalmat az olvadékban. Továbbá ismert tény, hogy az oxidok az öntési folyamat közben a formában turbulens áramlások közben jönnek létre. Ugyanakkor ezen oxidokat nem követik nyomon az olvadékkezelést követően. Ezért van szükség arra, hogy a minőségi öntvények folyamatos és üzembiztos előállításához az olvadékok minőségét pontosan meghatározzuk, mindenek előtt a nemfémes szennyezőket (oxidok, nitridek és más intermetallikus vegyületek), különválasztva az olvadékban oldott hidrogéntartalomtól. A nemfémes szennyezők ugyanúgy, mint a hidrogén okozta porozitás, befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat. A 8. ábra azokat a befolyásoló tényezőket foglalja össze, amelyek az anyagszerkezeti inhomogenitás kialakulása révén rontják a mechanikai tulajdonságokat.



8. ábra. A hidrogén és a nemfémes szennyezők közötti kölcsönhatás, és hatásuk az anyagi tulajdonságokra

A hidrogén az egyedüli gáz, amely technikai körülmények között oldódik a folyékony alumíniumban és a dermedés során gázporozitást okoz. A hidrogén molekuláris megjelenésének előfeltétele az olvadékban a heterogén csiraképződés az érdes felületeken. Ilyen feltételek főleg az oxidoknál és további nemfémes zárványoknál adódtak. Ezért a magas hidrogéntartalom legtöbbször magas oxidtartalommal kapcsolódik össze, és fordítva. A gyakorlatban az oxidszegény olvadékok gázban is szegények. Az oxidban gazdag olvadékok könnyen vesznek fel gázt és csak nehezen gáztalaníthatók.

2.3.1. A hidrogéngáz forrásai az alumíniumolvadékokban

Nemzetközi tapasztalatok szerint a gázporozitási selejt teszi ki az alumíniumöntődékben az összes metallurgiai selejt döntő hányadát.

Az olvadék által felvett hidrogén forrása elsősorban a vízgőz, amely egyrészt származhat a füstgázok vízgőztartalmából (a szénhidrogének elégésének termékeként), a rosszul előmelegített tégelyfalazatból, a betétanyag, a szerszámok, a kezelősók stb. nedvességtartalmából is, vagy egyszerűen a levegő páratartalmából [1].

A hidrogén alumíniumolvadékban való oldhatósága a vízgőz nyomásának függvényében:

$$w_H = k_{H_2O} (p_{H_2O})^{1/2} \quad (2)$$

- w_H hidrogénkoncentráció, $\text{cm}^3/100 \text{ g}$
- k_{H_2O} oldhatósági együttható, 1000 K-nél 0,0462
- p_{H_2O} a vízgőz parciális nyomása, hPa

Logaritmusos formában kifejezve és a hőmérsékletet figyelembe véve:

$$\lg w_H = \frac{1}{2} \lg p_{H_2O} - 5800/T + 5,58 \quad (3)$$

- T az olvadék hőmérséklete, K

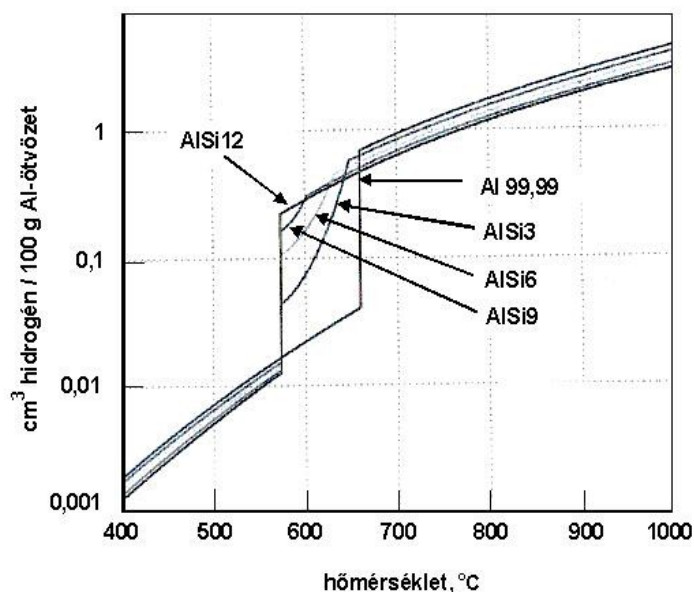
A 3. egyenletből következik, hogy a vízgőznek már alacsony parciális nyomásánál is oldódik a hidrogén az alumíniumban, és a számított oldhatósági adatok a gyakorlati értékeknek ($0,3\text{--}0,9 \text{ cm}^3/100\text{g}$) megfelelnek. A vízgőz az alumíniumolvadékkal reakcióba lép, alumínium-oxid és hidrogéngáz keletkezik az alábbi reakció szerint:



Az alumíniumolvadék a hidrogént atomos formában oldja, lehűléskor az olvadék hidrogénben túltelítetté válik és H_2 buborékok válnak ki.

A kiváló gáz miatti porozitás a megszilárdulás során annak köszönhetően keletkezik, hogy a hidrogén oldhatósága a folyékony, illetve a szilárd alumíniumban jelentősen különbözik, közelítőleg $0,9 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/100 \text{ g}$ fém, illetve $0,03 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ fém (9. ábra). A fém megszilárdulása közben a hidrogén átdiffundálódik a megszilárduló fázisból a folyadékfázisba, ami így egyre dúsabb lesz a gázra nézve. Amennyiben az új gázfázis létrejöttéhez szükséges feltételek adottak, úgy elindul a hidrogénbuborékok képződése [2], [6], [7].

A 9. ábra a különböző alumínium-szilícium ötvözetekben oldódó hidrogén mennyiségét ábrázolja a hőmérséklet függvényében.



9. ábra. A különböző összetételű alumínium-szilícium ötvözetekben oldódó hidrogén mennyisége [9]

A 9. ábra alapján az olvadékban likvidusz hőmérsékleten $0,43 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ alumínium, míg szilárd állapotban $0,05 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ alumínium az oldott hidrogéntartalom.

Az alumíniumolvadékban a hidrogén oldhatósága exponenciálisan függ a hőmérséklettől. A hőmérséklettel erőteljesen emelkedő gáztartalom az egyik oka a magas hőmérsékleten történő öntésnél fellépő nagyobb gázporozitásnak.

A gyakorlatból ismert, hogy nyirkos időjárás és/vagy magasabb környezeti hőmérséklet esetén a levegő megnövekedett páratartalmának köszönhetően a gázporozitás megjelenésének esélye is növekszik. A levegő páratartalma általában 17 g/Nm^3 , ami a vízgőz kb. 1–2 hPa parciális nyomásának felel meg. Kirívó esetekben megnövekedhet a levegő nedvességtartalma akár 40 g/Nm^3 -re is, ami 6 hPa vízgőznyomásnak felel meg (35 °C, 100%-os páratartalom). Mindebből elméletileg $10 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ -os hidrogéntartalom-változás is kialakulhat az olvadék hőmérsékletének függvényében. Fosszilis tüzelőanyagokkal fűtött olvasztókemencék fűtőgázának vízgőztartalma még nagyobb lehet. Extra könnyű fűtőolaj teljes elégetésekor 12,5 térf.%, földgáztüzelés esetén 19,5 térf.% vízgőz keletkezik, ami 125–195 hPa parciális nyomásnak felel meg. Mindebből az következik, hogy az alumíniumolvadékok hidrogéntartalmának legfőbb forrásai a vízgőztartalmú fűtőgázok. Saját

mérések alapján mondható, hogy egy gáztüzelésű kemencében olvasztott olvadék oldott hidrogéntartalma elérheti a max. $0,8 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ értéket is [6], [7].

2.3.2. Az alumíniumolvadékok hidrogéntartalmának csökkentésére alkalmazott módszerek

Mind a primer alapanyagból, mind a hulladékfémből olvasztott alumíniumötvözetek hidrogéntartalma nagyobb, mint az a tapasztalati határ, amely az öntvényben hidrogénporozitást okoz. Ebből következik, hogy az alumíniumbázisú olvadékokat gáztalanítani kell. Hogy milyen mennyiségű oldott gáztartalom káros az ötvözetek számára, az elsősorban a minőségi követelményektől függ.

A hidrogén eltávolítása, illetve az alacsonyabb hidrogénszint elérése alapvetően fizikai és/vagy kémiai eljárásokkal történik. Miután a hidrogénfelvétel ill. -tartalom nagysága hőmérséklet- és nyomásfüggő, és az eltérő oldhatóság miatt igen nagy koncentrációváltozás következik be a szilárd és folyékony állapot között, fizikai úton a hidrogént megfelelő mértékben hőmérsékletcsökkentéssel (pihentetési eljárás), vákuum alkalmazásával vagy a parciális nyomás csökkentésével (az olvadéknak egy megfelelő gázzal való öblítésével) távolíthatjuk el.

A gyakorlatban többnyire az „öblítőgázos” kezelést, másodsorban a vákuumos eljárást használják. Ha az öblítőgázos eljárásnál klórtartalmú anyagot használnak, az nem csak fizikailag hat, hanem kémiai is, amennyiben sósavat képez, amely az olvadékot elhagyja, viszont kifejezetten környezet- és egészségkárosító hatással bír. A vákuumos gáztalanításnak környezetbarát mivolta és a műszeres optimalizálás lehetősége miatt egyre nagyobb a jelentősége, hátránya az idő- és energiaigénye [2].

Az alumíniumolvadék oldott elemi (gáz, illetve fém) és idegenfázisú (vegyület alapú zárvány) szennyezőket tartalmaz. Az inert, illetve aktív gázzal végzett öblítőgázos kezelés szinte minden típusú szennyező koncentrációját csökkentheti. Kivételt képeznek az alumíniumnál kevésbé reakcióképes oldott fémek (ötvözők), amelyeknek a szabványokon belüli koncentrációját az öntésre kerülő adag összeállításánál kell biztosítani. A szokásos öntödei körülmények között eltávolítható szennyezők transzportmechanizmusa összetett folyamat, s az alábbiakban jellemezhető:

- az oldott hidrogén diffúziója az öblítőgáz buborékok határfelületéhez, ott az egyensúlynak megfelelő megoszlás és a buborékokkal való felúszás,
- az oldott alkáli- és alkáliföldfémek diffúziója az öblítőgáz buborékokhoz, és reakciójuk a reagenssel (klórral), majd a képződő kloridszemcsék felúszása,
- az idegenfázisú zárványok kapcsolódása a velük érintkező öblítőgáz buborékok felületéhez, és a buborékokkal történő felúszásuk.

Mindegyik esetben az összes buborékfelület és a buborék-olvadék érintkezési idő az alapvető a folyamatok sebessége szempontjából. E két alapfeltételt megfelelő fajlagos gázbevitellel és a bevitelnél kialakuló buborékok megfelelően kis méretre történő mechanikus diszpergálásával lehet megvalósítani. Bármely szennyező eltávolítási hatásfokát ezért alapvetően az öblítőgáz bevitel jellemzői határozzák meg. A hidrogén eltávolításának sebessége azonban argon alkalmazásakor akár kétszerese is lehet a nitrogén használatakor mérthez képest [20]. A nitrogénes gázöblítés hatásfokát a fizikai jellemzők mellett a buborékok felületén nagyobb hőmérsékleteken keletkező nitridek is kedvezőtlenül befolyásolják [20].

2.3.2.1. Vákuumos gáztalanítás

Vákuumos kezelés során a gáztalanítás kizárólag fizikai úton történik. Nyomáscsökkentés hatására a fémolvadékban keletkező és felszálló gázbuborékok tisztítóhatást fejtenek ki. A nagy fürdőmélység miatt (nagy diffúziós út) és a fém jelentős metallosztatikus nyomása következtében a gáztalanodás lassú. A folyamatot az olvadék mozgatásával vagy nitrogénes gázöblítéssel gyorsítják. Az eljárást üstben vagy tégelyben végzik, az üst fölé vákuumsisakot vagy vákuumfedeleket helyeznek. A vákuumos gáztalanító berendezések felszerelhetők ellenállás fűtéssel, hogy az esetleg hosszabb ideig tartó kezelések esetén a nagy hőmérsékletvesztesség elkerülhető legyen. A vákuum nagysága 1–3 mbar, a kezelés időtartama 3–6 perc [2].

2.3.2.2. Fémtisztítás gázokkal

A gázokkal történő fémtisztítás többféleképpen hajtható végre; öblítőgáz fürdőbe való bevezetésével, gázt leadó sókeverék fürdőbe való bekeverésével vagy gázt leadó tabletták merülőharanggal történő bevitelével. Az öblítőgázok hatásukat tekintve kétféleképpen lehetnek: inert gázok (pl. N_2 , Ar) vagy kémiaiaktív gázok (pl. Cl_2 , SF_6). Az inert gázokkal történő

gázöblítés esetén csak mechanikai tisztítást érünk el. Ezzel szemben az aktív gázokkal végzett gáztalanítás esetén az aktív gáz vegyileg is leköti az olvadék hidrogéntartalmát. A reakció során keletkező, nem oldódó reakciótermék felúszik az olvadék felszínére, ahonnan eltávolítható.

Gázöblítéses fémtisztítás céljából elsősorban nitrogént, argont és klórt használnak. A két előbbi kizárólag fizikai úton (parciális nyomás csökkentése), míg a klór kémiai is hat. A klórral történő kezelés során a legrövidebb a kezelési idő, viszont az alkalmazása során nagy figyelemmel kell lenni annak a legtöbb technológiai felszereléssel szembeni agresszivitása, egészség- és környezetkárosító hatása miatt.

A nitrogén és az argon általában gázpalackokban áll rendelkezésre, folyékony állapotban való tárolásuk általában csak nagyobb mennyiségeknél gazdaságos. Az öntödei gyakorlatban rendelkezésre állnak még olyan sók is, amelyek a kívánt kezelő gázokat kémiai kötött formában tartalmazzák és ezeket csak az olvadékba való adagolás után szabadítják fel, mint pl. a hexaklór-etánt (C_2Cl_6), mint klórhordozót, 90 tömeg% klórral.

2.3.2.3. Nitrogénnel és argonnal történő fémtisztítás

Mindkét gáz kizárólag fizikailag hat, illetve mechanikusan, amennyiben a folyékony fémbe vezetett öblítőgáz buborékokba a jelenlévő hidrogén bediffundál a parciális nyomás csökkenése miatt, és így eltávozik. Az esetlegesen jelen lévő oxidok az öblítőeffektus miatt a felszínre kerülnek, ahol célszerűen felvitt sőrétégben megkötődnek. A gáz bevezetése túlnyomórészt grafitcsöveken keresztül történik. A minél nagyobb lehetséges diffúziós felület elérése érdekében minél több és minél kisebb buborék kell, hogy a fémolvadékba jutva felszálljon. Ez egy olyan grafitcső segítségével történik, amelyen hosszanti bordázat található. A cső alján található kilépőnyílásoknak az a szerepe, hogy minél finomabb és egyenletesebb gázeloszlást biztosítsanak.

Ezen a módszeren alapul az ún. SNIF-eljárás (spinning nozzle inert flotation), amelynek alkalmazása csak nagy fémmennyiségeknél gazdaságos. Alkalmazásakor a szükséges gáznyomás igen alacsony, de természetesen a fürdő mélységétől függ. Az értéke 50–100 cm-es fürdőmélységnél kb. $2\text{--}4\text{ N/cm}^2 \geq 0,2\text{--}0,4\text{ bar}$. A gázfelhasználás kb. 250–500 liter/tonna alumínium [1].

2.3.3. Az alumíniumolvadékok gáztartalmának meghatározása

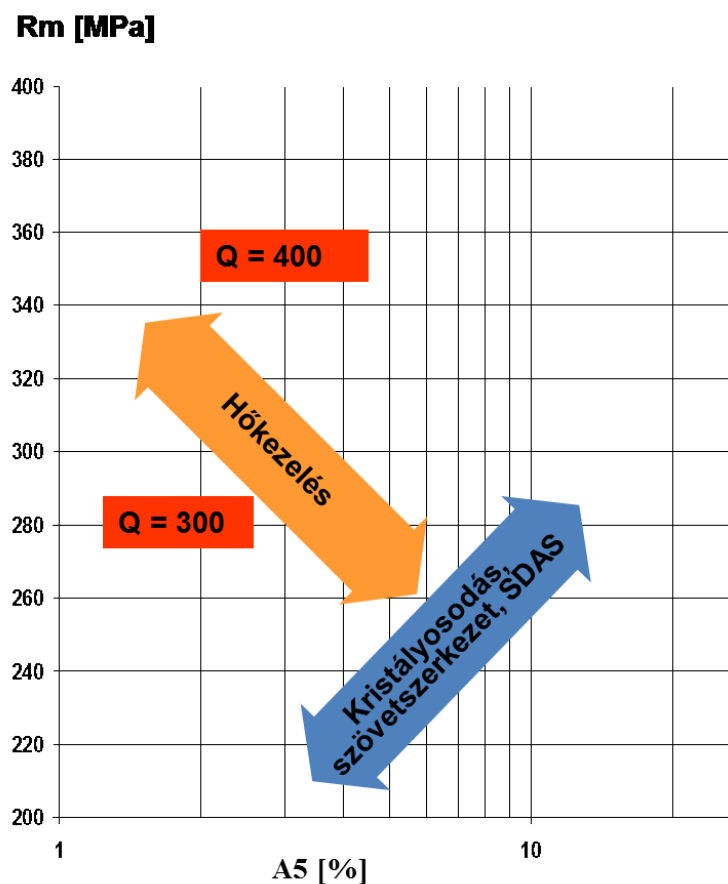
Mivel a tapasztalatok szerint az alumíniumöntődékben a gázossági selejt teszi ki az összes metallurgiai selejt döntő hányadát, már a technológiai műveletek elején ismerni kell a hidrogéntartalmat, hogy a meg nem engedett nagy gáztartalmak esetén a technológiai műveletsorba – akár a gáztalanítás megismétlésével – be lehessen avatkozni. Az alumíniumöntészetben az üzemi, félkvantitatív, gyors gáztartalom-meghatározó módszerek terjedtek el. Ezek a módszerek természetesen nem adnak abszolút pontos eredményt, mint a laboratóriumi vákuumextrakciós módszerek, de az eljárás, ill. a berendezés folyamatos használatával üzemi szinten nagyon rövid idő alatt megbízható, egymással összehasonlítható, reprodukálható értékek birtokába lehet jutni [3], [4], [5].

Az alumíniumolvadékok gáztartalmának meghatározására szolgáló készülékeket a 3. fejezetben mutatom be részletesen.

2.4. Nemfémes zárványok az alumíniumolvadékban

Az alumíniumötvözetek olvadékminőségtől függő tulajdonságait nagyrészt az oxidok és a nemfémes szennyeződések, zárványok befolyásolják, ill. a hidrogéntartalom, mint porozitási ok, továbbá a szemcsefinomság és/vagy a nemesítési, módosítotttsági fok. A nemfémes szennyeződések, úgymint oxidok, nitridek és más intermetallikus vegyületek, az alumínium nyersanyagból (beolvasztott alumíniumból) származnak. Befolyásolják a szilárdságot, a kúszószilárdságot, további okozói külső hibáknak (csírahelyei a hidrogénporozitásnak) és befolyásolják az öntvényrészek felületi minőségét.

A porozitás és a szemcseméret hatása a minőségi indexre (2.2. fejezet 13. oldal) már jól ismert, az oxidok és más nemfémes szennyezők és az öntészeti ötvözetek minősége közötti mennyiségi összefüggés kevésbé kutatott terület [73]. A 10. ábra azt mutatja be, hogy a szilárdsági paramétereket, ezáltal az öntvény minőségét, milyen lehetőségekkel lehet javítani.



10. ábra. A szilárdsági paraméterek javítási lehetőségei

A minőségjavítás egyik lehetősége a hőkezelés, melyet gazdasági okok miatt célszerű csökkenteni vagy elkerülni. A másik lehetőség a kristályosodási viszonyok és az olvadék minőségének megváltoztatása. Az olvadék minőségének javításában a következő tényezőknek van jelentős szerepe: kristályosodás, szemcseméret, szemcsefinomítás, módosítás, inhomogenitások, gázporozitás és lunker csökkentése, továbbá a hűtés sebességének növelése, azaz, ha intenzív hőelvonást alkalmazunk kristályosodás közben, akkor a DAS (dendritág távolság) kisebb lesz.

A porozitás és a szemcseméret befolyása a minőségindexre jól ismert, de az oxidok, különösképp a nemfémes zárványok hatásai az alumíniumötvözetek mechanikai tulajdonságaira csak kevésbé ismertek. Ennek az oka az, hogy nem áll rendelkezésre on-line analízismódszer a nemfémes szennyezők mennyiségének mérésére.



11. ábra. A minőségi index kapcsolata az olvadékminőséggel és a mechanikai tulajdonságokkal

A szakirodalom [73] és a nemzetközi szakma véleménye szerint jelenleg nincs alkalmas módszer a zárványosság üzemi körülmények között alkalmazható gyors és egyszerű kimutatására, ezért az olvadék zárványtartalmának csökkentésénél is csak útkeresés folyik. Így nincs elfogadható megoldás a tisztítási eljárások hatékonyságának a megkövetelt technológiai biztonság értelmében történő megítélésére és felügyeletére sem. Csak az oldott hidrogéntartalom és a nemfémes szennyeződések külön-külön történő meghatározása esetén lenne lehetőség az olvadék hatékony kezelésére [73].

A jelenlegi zárványvizsgálati módszerek (Prefil, PoDFA, LIMCA) közül a Prefil ad eredményt egyedül a vizsgálat elvégzése közben (átfolyási sebesség, átfolyt tömeg), az így kapott eredmények viszont nem csak a zárványtartalom eltéréséből eredően különböznek és adódhatnak, hanem az olvadék más fizikai-kémiai tulajdonságai is nagymértékben befolyásolják a folyamatot. Jelentős szerepe van az olvadék gáztalanításának és a

szemcsefinomító, valamint a módosító adalékok hatásának, melyek befolyásolják az olvadék viszkozitását, határfelületi tulajdonságait, ezáltal megváltoztatják a szűrőn átfolyó olvadék mennyiségét és az átfolyás viszonyait. Problémát jelent az is, hogy egyelőre nincs olyan vizsgálati módszer, mely bemutatná az egyes befolyásoló tényezők hatását az átfolyási görbére. A szűrőn fennmaradó zárványok utólagos vizsgálata, kiértékelése hosszadalmas és költséges, de elengedhetetlen a berendezések által szolgáltatott eredmények megértéséhez és kiegészítéséhez.

Szükség lenne egy új módszer és műszer kifejlesztésére, ehhez azonban meg kell találni azt az elméleti hátteret, amely kombinálja az eddig vizsgált paramétereket az olvadék fizikai-kémiai tulajdonságaival, illetve a további befolyásoló tényezőkkel [73].

A 2. táblázat áttekintést ad az alumíniumötvözetekben található nemfémes szennyezőkről és azok szokásos méreteiről.

2. táblázat. Áttekintés az alumíniumötvözetekben található nemfémes zárványokról

Zárványok típusai	Összetétel	Morfológia	Sűrűség [g/cm ³]	Méret [μm]
Oxid	Al ₂ O ₃	Részecske	3,97	0,2–30
		Membránok	3,97	10–5000
	MgO	Részecske	3,58	0,1–5
		Membránok	3,58	10–5000
	MgAl ₂ O ₄	Részecske	3,6	0,1–5
		Membránok	3,6	10–5000
	SiO ₂	Részecske	2,66	0,5–5
Só	Klorid	Részecske	1,98–2,16	0,1–5
	Fluorid			
Karbid	Al ₄ C ₃	Részecske	2,36	0,5–25
	SiC	Részecske	3,22	0,5–25
Nitrid	AlN	Részecske	3,26	10–50
		Membránok		
Borid	TiB ₂	Részecske	4,5	1–30
		Klaszter		
	AlB ₂	Részecske	3,19	0,1–3

A zárványméret a néhány mikrométeres részecskétől a néhány milliméteres alakig terjedhet. A szokásos kohóalumínium a nemfémes szennyezőket a következő mennyiségben és fajtáiban tartalmazhatja: 6–16 ppm oxid; 3–12 ppm nitrid; 2–12 ppm karbid és kevesebb, mint egy ppm kryolit és borid.

2.5. Kölcsönhatás az olvadék oxid- és a hidrogéntartalma között

Az alumíniumolvadékban az oxid- és a hidrogéntartalom között szoros összefüggés van, amit ez idáig még nem tudtak meghatározni. Az oxidok csírahelyeket képeznek a hidrogénbuborékok kialakulásához. Az olvadék növekvő oxidtartalma a hidrogénbuborékok képződésének növekedését vonja maga után. A hidrogéntartalom dermedés közben gázbuborékok képződéséhez vezet az öntvényben, amelyek ugyanúgy mint az oxidok, az öntvény mechanikai tulajdonságait rontják. A gázhólyagok mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatása - sima felületük és túlnyomórészt gömbszerű alakjuk miatt - lényegesen csekélyebb, mint a nemfémes szennyezők és zárványok okozta hatás, mivel az oxidok gyakran mutatnak hosszú, nyújtott, szaggatott megjelenési formát az öntvénytérben. A zárványok feszültségcsúcsokhoz vezethetnek, amelyek jelentős külső bemetsző hatásuk következtében a mechanikai tulajdonságokat lényegesen lerontják. Az alumíniumolvadékok hidrogéntartalma a különböző eljárásokkal elég pontosan meghatározható.

3. Járműipari öntészeti alumínium-szilícium olvadékok oldott gáztartalmának és zárványosságának vizsgálata

A vevői elvárásoknak megfelelő öntvények gyártásának egyik fontos feltétele a jó minőségű olvadék biztosítása, az oldott gáztartalom alacsony szintje, a szennyezőelemek mennyiségének és kedvezőtlen hatásának csökkentése. Témaválasztásom és kutatásom oka, hogy tapasztalatok szerint az öntvényekben előforduló zárványok kialakulása, vagy a porozitásképződési hajlam többek között az olvadékok szennyezőelem-tartalmával függ össze.

Célkitűzés

A kísérleti munkát, és ezáltal célkitűzéseimet is, több meghatározó részre bontottam, melyek szorosan összefüggenek egymással.

Kísérleteim első részének célja az volt, hogy a járműipari öntészeti alumínium-szilícium olvadékokban oldott hidrogén kimutatására alkalmas Alspek H hidrogénszenzor közvetlen vizsgálati módszerét összehasonlítsam az MK sűrűségindex közvetett vizsgálati módszerével. A két mérési módszer eredményei között megpróbáltam összefüggéseket keresni; ezen túl célom volt a berendezések előnyeinek és hátrányainak megismerése, gyakorlati alkalmazásuk indokoltságának bemutatása és ez által a gyártási biztonság növelése, a selejt csökkentése.

Kísérleteim második részében különböző rotorok hatásfokát teszteltem különböző gépbeállítási paraméterek és különböző ötvözetek esetén, azaz változtattam a rotor fordulatszámát és a kezelési időt. Az olvadék oldott hidrogéntartalmát mind indirekt módszerrel, a sűrűségindex meghatározásával, mind direkt módszerrel, a hidrogénszenzor segítségével mértem, így amellet, hogy információt kaptam a különböző rotorok hatásfokával kapcsolatban, a két mérési módszer további vizsgálatára és a kapott eredmények közötti összefüggések keresésére is lehetőségem nyílt.

Kísérleteim harmadik részében a rotoros gáztalanító kezelések hatását vizsgáltam az olvadék zárványtartalmára. A rotoros gáztalanító kezelések hatásaként azt várjuk, hogy az olvadéknak nem csak az oldott hidrogéngáz-tartalma csökken, hanem a zárványtartalma is. Célom volt, hogy összefüggést találjak az olvadék rotoros gáztalanító kezelése és a

zárványtartalma között. Ezekhez a kísérletekhez Prefil-berendezéssel mértem az olvadék minőségét, azaz az átfolyási jellemzőket.

3.1. Kísérleti körülmények

A kutatómunkámhoz szükséges kísérleteket két, járműipari ötvényeket gyártó cégnél végeztem, ahol a következő termékcsoportokat gyártják: fékalkatrész, szívótorok, elsőkerék-felfüggesztés, főfékhenger stb., a másik öntöde különböző hengerfejeket gyárt. Az oldott hidrogéntartalomra vonatkozó méréseket direkt működésű hidrogénszondával és indirekt működésű sűrűségindex meghatározó berendezéssel végeztem, a zárványtartalomra vonatkozó eredményeket pedig a Prefil-berendezés használatával kaptam. A méréseket minden esetben üzemi körülmények között végeztem, ahol az olvadékkezelés minden esetben rotoros gáztalanító berendezéssel történt, de más-más rotortípus és gépbeállítási paraméterek használata mellett.

3.1.1. A vizsgált ötvözetek bemutatása

A 3. táblázat mutatja be az általam elvégzett kísérletek során vizsgált ötvözetek elemeinek alsó és felső határértékeit.

3. táblázat. A vizsgált ötvözetek elemeinek alsó és felső határértékei (tömeg %)

Elemek és határértékeik, %	A vizsgált ötvözetek									
	A356 AlSi7Mg		A226.10 AlSi9Cu3		A319 AlSi8Cu3		A233 AlSi10Mg		LM22 AlSi5Cu3	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Si	6,50	7,50	8,10	9,50	8,10	9,00	9,10	10,80	4,5	6,0
Cu		0,10	2,00	3,00	3,10	3,50		0,33	2,6	3,6
Mg	0,30	0,50	0,20	0,50	0,30	0,50	0,30	0,45		0,05
Ti	0,10	0,20	0,06	0,15	0,10	0,15	0,10	0,18	0,20	0,25
Sr	0,015	0,025	0,015	0,027	0,010	0,016	0,022	0,037		
Mn		0,10	0,15	0,50	0,20	0,55		0,38		0,55
Zn		0,10		1,00		0,80		0,30		0,20

A 3. táblázat alapján az ötvözőelemeken kívül a titán a szemcsefinomító hatása, a stroncium az eutektikus szilíciumfázist nemesítő hatása miatt az előírt tartományban kell legyen.

3.1.2. Olvasztás és olvadékkezelés

Az általam vizsgált, öntésre szánt adagok olvasztásához rendszerint 60% saját vagy vásárolt másodnyersanyagot (hulladékot) és 40% tömböt használtak, ez utóbbit olvadékkal is helyettesítették. Az olvasztás Striko- és Dalian- típusú gáztüzelésű aknás kemencékben, ill. Morgan-típusú, ugyancsak gáztüzelésű tégelyes kemencékben történt. Az olvasztókemencékből az olvadékot kihordó üstökbe csapolják, majd a kezelőállomáson rotoros gáztalanítás során eltávolítják az olvadék oldott hidrogén-tartalmát, ill. a gáztalanítás során különböző kezelőszókat is adagolnak. A különböző ötvözetből gyártott olvadékok gáztalanítása során a rotor fordulatszáma 370–520/min, az adagolt N_2 mennyisége 15–20 l/min, a kezelési idő 8–20 min között változott. Kezelés után az olvadék ellenállás fűtésű, 800–1000 kg kapacitású tégelyes hőntartó kemencékbe került.

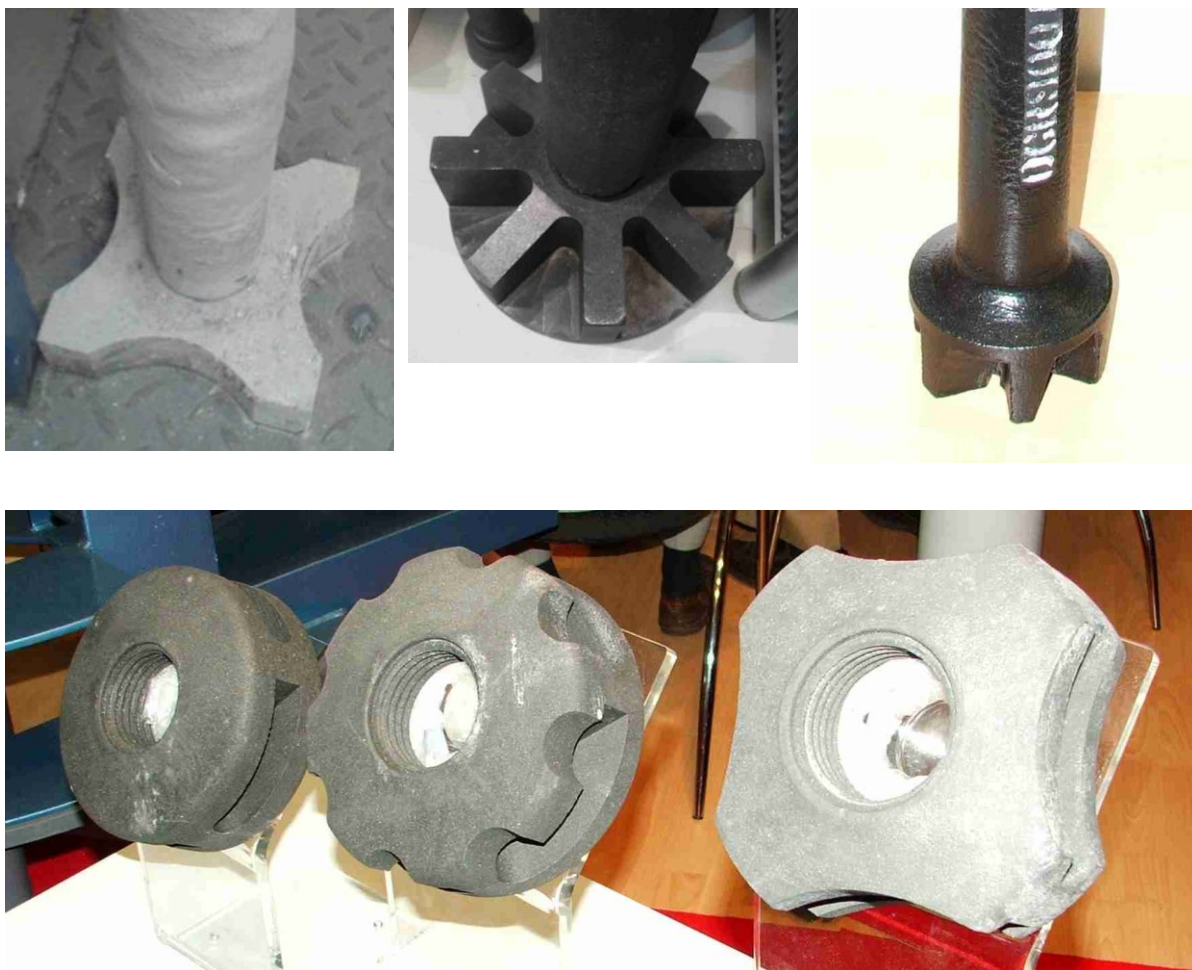
A módosító- és ötvözőanyagok adagolása az olvadék kémiai összetételének spektrométeres ellenőrzése után történt.

3.1.3. A gázokkal történő fémtisztítás berendezései

Lándzsa. A kezelő- vagy öblítőgáz bevezetésére szolgáló cső. Mivel nincs forgó mozgás, a buborékok mérete nagy, emiatt a felületük kisebb, nem hatékony a gáztalanítási művelet. További hátrány még, hogy csak egy helyen hat a lándzsán keresztül bevezetett gáz, ezért kevésbé hatékony és nagyobb a gázfelhasználás. Lándzsa használata esetén a buborékok átmérője 12 mm feletti [3]. Ez azért van, mert egyrészt a lándzsa sugara lényegesen nagyobb a fúvóka sugaránál, másrészt lándzsa használatakor a gáz térfogatárama is jelentős [70]. A hatékonyabb gáztalanítást végző berendezések porlasztják a bejuttatott gázt.

Rotoros gáztalanító. Nagyobb hatékonyságának oka az, hogy a nagyon apró gázbuborékok egyenletes eloszlásban, hosszasan időznek az olvadékban. A hidrogénnek a gázbuborékokba történő diffundálásához a lehető legnagyobb felületet a gázbuborékok átmérőjének rotorral (impellerrel) történő minimalizálásával – kisebbre, mint 4 mm – érhetjük el. A forgó rotorfej a centrifugális erő következtében a fémet és a gázbuborék áramlást is vízszintesen kifelé mozgatja, így a buborékok az egész fémfürdőt átjárják [75]. A tapasztalatok szerint 4 ± 1 mm átmérőjű buborékok kis térfogatáram esetén akkor keletkeznek az alumíniumolvadékban, ha a fúvóka sugara 0,1 mm körüli [70].

A 12. ábrán különböző típusú és geometriájú rotorokat mutatok be.

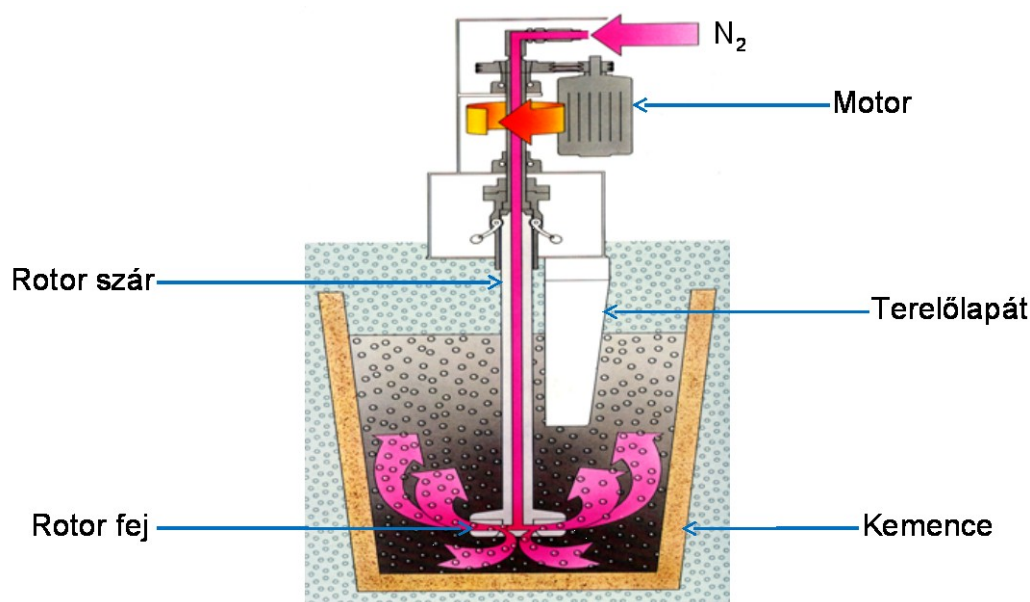


12. ábra. Különböző típusú és geometriájú rotorok

Manapság az egyes cégek által gyártott rotorok forgalmazásában nagy verseny folyik. A gyártók próbálnak eleget tenni a kihívásoknak és az elvárásoknak, az a cél, hogy a rotor minél hosszabb élettartammal rendelkezzen, a hatékony gáztalanítást minél rövidebb gáztalanítási idő alatt lehessen elérni és a rotor hatékonysága a kezelések számának növekedésével, azaz a rotor kopásával ne csökkenjen.

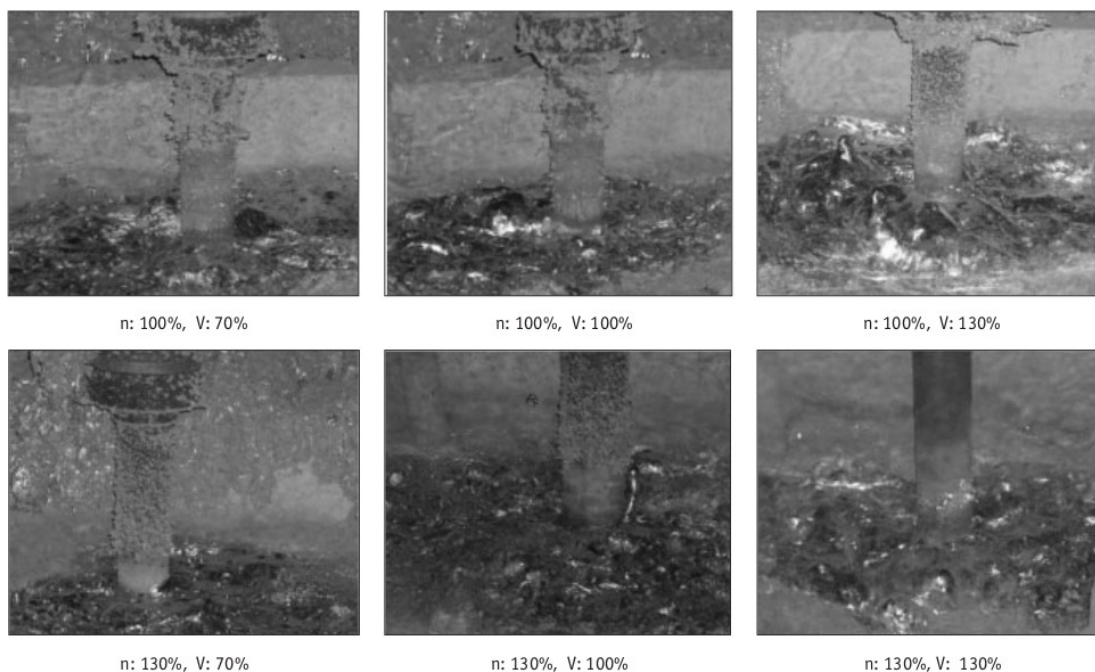
A rotoros gáztalanító berendezés használatakor fontos a rotor és a kezelőüst átmérője közötti kapcsolat. Nagyobb átmérőjű kezelőüsthöz vagy tégelyhez nagyobb átmérőjű rotort kell használni, míg kisebb átmérőjű kezelőüsthöz vagy tégelyhez kisebb átmérőjű rotort célszerű alkalmazni. Ezen kívül fontos a kezelőüst vagy tégely átmérőjének és magasságának viszonya is. A lehető legjobb hatásfok elérése érdekében a magasság az átmérő 1,3–1,7-szerese legyen. Ilyen magasság- és átmérőviszonyok mellett a metallosztatikus nyomás miatt a buborékok lassabban haladnak felfelé az olvadékban, ezáltal jobb a hatásfok, mivel a buborékok az olvadékban való hosszabb tartózkodás miatt

több gázt tudnak megkötni, így a nitrogéngáz felhasználás is csökken. A gáztalanítási művelet a fürdő fokozott hűlésével jár, ezért célszerű megfelelő hőszigetelésű üstöket használni. A 13. ábrán a rotoros gáztalanító berendezést és működését mutatom be.



13. ábra. A rotoros gáztalanító berendezés sematikus ábrázolása

A szakirodalomban [20] [76] [77] [78] találtam rá példát, hogy a rotoros gáztalanítás hatékonyságának, a buborékok méretének és eloszlásának megfigyelésére, valamint az oldott gáz koncentrációjának folyamatos és pontos mérésére folyékony közegként vizet alkalmaztak, melynek az oldott oxigéntartalmát mérve vizsgálták a nitrogénes öblítés hatékonyságát. A kísérletek fő célja az volt, hogy az egyes faktorok (tényezők) hatáserősségét összehasonlítsák. Az eredmények alapján elmondható, hogy a vizsgált kísérleti tartományban a legerősebb relatív hatása a rotor fordulatszámának van, míg a gázáram intenzitása a leggyengébb hatásúnak bizonyult a vizsgált faktorok között. Az öblítőgáz mennyiségének a növelése csak akkor lehet hatékony beavatkozás, ha a rotor képes a gázt apró buborékokban eljuttatni a kezelőtér teljes térfogatába [20]. A kísérleti tartományban a legnagyobb hatékonyságot (35 % visszamaradó gáztartalom) a legnagyobb fordulatszám – legnagyobb gázáram – legkisebb vízáram beállítás mellett érték el [20]. A 14. ábrán egy ilyen kísérlet során az olvadékfelszínről készített jellemző képeket mutatom be különböző alkalmazott gázáram és fordulatszám mellett.



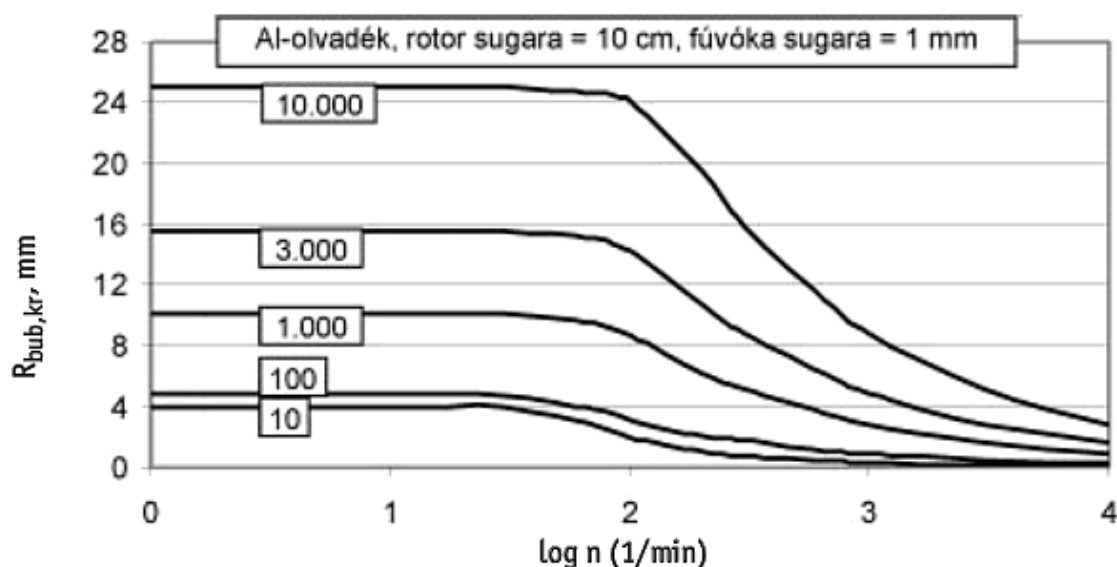
14. ábra. Az olvadékfelszín jellemző képei a szokásos üzemi alapérték százalékában megadott fordulatszám (n) és gázáram (V) beállítások mellett [20]

Kaptay György szerint a rotort elhagyó buborék kritikus sugara meghatározható [70]. Analitikai megoldás csak akkor létezik, ha mind a rotor forgási sebessége, mind a gáz térfogatárama olyan nagy, hogy mind a felhajtóerő, mind a határfelületi összetartó erő elhanyagolhatóvá válik. A 6. egyenlet a buborék kritikus sugarának számítását mutatja.

$$R_{bub, kr.} = 0,87 \times \sqrt{\frac{Q_g}{n \times R_{rot}}} \quad (5)$$

- $R_{bub, kr.}$ a buborék kritikus sugara (mm)
- Q_g a gáz térfogatárama (cm^3/s);
- n a fordulatszám (1/min);
- R_{rot} a rotor külső sugara (mm).

A 15. ábra mutatja be a forgó rotorról leszakadó buborék kritikus sugárértékeit a rotor fordulatszámának és a gáz térfogatáramának függvényében.



15. ábra. Forgó rotorról leváló buborék kritikus sugara a rotor fordulatszámának és a gáz térfogatáramának a függvényében (gáz térfogatáramának értékei alulról felfelé haladva a görbéken: 10, 100, 1000, 3000 és 10000 cm³/s) [70]

3.1.4. Vizsgálati módszerek és berendezéseik

Az oldott hidrogéntartalom vizsgálatára és mennyiségének meghatározására számos módszer és berendezés létezik, mint pl. az első buborékos gázmeghatározó berendezés és az etalonsor. Ebben a fejezetben csak az általam használt indirekt módszerű sűrűségindex meghatározási és a direkt módszerű hidrogénszondás eljárásokat mutatom be.

3.1.4.1. A sűrűségindex meghatározása

Indirekt hidrogéngáz-tartalom meghatározási módszer. A sűrűségindex meghatározásához a folyékony alumíniumötvözetből két próbát kell venni. Az egyik próba normál, atmoszférius nyomáson, míg a másik 80 mbar vákuumban szilárdul meg. Vákuumban a hidrogéngáznak nagyobb a térfogata és a mennyisége a megszilárdulás közben, ami csökkenti a próbatest sűrűségét. Egy speciális mérlegen mérjük le mindkét próba tömegét levegőn és ismert sűrűségű folyadékba merítve. A mérleghez kapcsolt elektronika Arkhimédész törvénye alapján a sűrűségindexet a következő képlettel számolja ki:

$$SI = 100 * \frac{(\rho_A \cdot \gamma_B)}{\rho_A} \quad (6)$$

- ρ_A atmoszférius nyomáson megszilárdult próba sűrűsége
- ρ_B vákuumban megszilárdult próba sűrűsége

A 16. ábrán a sűrűségindex meghatározó berendezést és a vákuumban, ill. levegőn megszilárdult próbát és metszetét mutatom be. Ez a vizsgálati módszer nagyon népszerű, használata széles körben elterjedt a világ öntődéiben.



16. ábra. A sűrűségindex meghatározására szolgáló berendezés, illetve a levegőn és a vákuumban megszilárdult próbatestek metszeteikkel

3.1.4.2. Az Alspek H hidrogénszenzor

A berendezés a hidrogéntartalom direkt meghatározására szolgál. Az utóbbi években felvetődött, hogy az alumíniumolvadékok hidrogéntartalmának mérésére szolgáló olyan eljárásoknál, mint például a sűrűségindex meghatározása vagy a parciális nyomás elvén alapuló direkt eljárás, időszerű egy új, megbízhatóbb mérési rendszer megalkotása. Ennek oka alapvetően az, hogy a sűrűségindex mérés indirekt módszer és az eredményt csak időkéssel kapjuk meg, ill. a parciális nyomás elvén alapuló direkt eljárásnál az egyidejű gáztalanítás során alkalmazott inert gáz jelenléte befolyásolja az eredményt. Ezért olyan új eljárás és berendezés kifejlesztése vált szükségessé, amely:

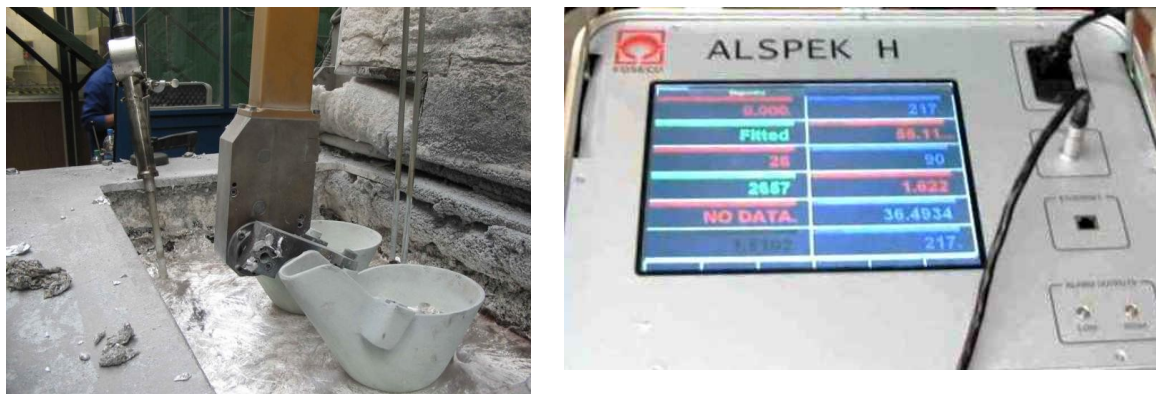
- lehetővé teszi a hidrogéntartalom gyors és pontos meghatározását;
- könnyen alkalmazható és ellenálló a környezeti behatásokkal szemben;
- alkalmas egyszeri, illetve tartós mérésre;
- a mérési adatokat rögzíti, tárolja és dokumentálja;
- a gáztalanítási folyamat szabályozása és optimalizálása betáplálható [13].

A berendezés fontosabb részegységei:

- szenzoros mérőcella, mely a hőmérő mellett található;

- protonvezető kerámia, ami a mérőcella működését biztosítja;
- stabil hidrogén referencia rendszer, mely a mérőcella működése szempontjából fontos;
- hőmérsékletmérő.

A 17. ábrán az Alspek H hidrogénszenzor berendezést mutatom be mérés közben, ill. a monitort, melyen a mért adatok láthatóak.

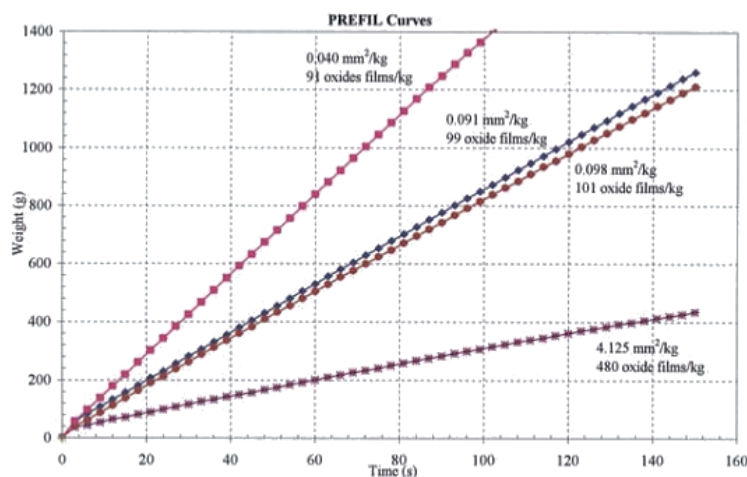


17. ábra. Alspek H hidrogénszenzor [13], [22]

A berendezés elektrokémiai alapokon működik. A Nernst-egyenlet alapján a hidrogén parciális nyomása a gáztérben közvetlenül meghatározható, ha a referencia rendszer parciális nyomása, a hőmérséklet és az elektrokémiai potenciál ismert. A Sieverts-törvény írja le az összefüggést a mért parciális nyomás és az olvadékban oldott hidrogénkoncentráció között. A két egyenlet kombinációja lehetővé teszi az olvadék hidrogéntartalmának közvetlen meghatározását [13]. A mérés megkezdése előtt a szondát szükséges előmelegíteni, hogy az esetleges nedvesség el tudjon párologni, majd csatlakoztatni kell a számítógéphez. A szükséges paramétereket, melyek befolyásolhatják az oldott hidrogéntartalmat (mint pl. ötvözet típusa) a mérések megkezdése előtt be kell vinni a rendszerbe. Ezek után a műszer készen áll a mérések elvégzéséhez, a szondát az olvadékba kell mártani, a kijelzőn ekkor a mért hőmérsékletet és az oldott hidrogéntartalmat látjuk. Egy visszaszámláló is van a képernyőn, mely jelzi, ha a mérés befejeződött és a szondát kiemelhetjük az olvadékból. Ezután a mérések megismételhetők, a szonda további előmelegítést nem igényel.

3.1.5. Az alumíniumolvadékok zárványtartalmának vizsgálata Prefil berendezéssel

A Prefil berendezés a fémolvadékok minőségének ellenőrzésére szolgáló készülék. A 18. ábra mutatja a berendezést, ill. egy kiértékelő diagramot. A diagramon egy szűrőn átfolyt fémtömeg van ábrázolva az idő függvényében.



18. ábra. A Prefil készülék és egy kiértékelő diagram

A Prefil vizsgálati módszer alkalmazása során egy kis méretű kvarchomok szűrőn (pórusméret: 90 μm) [73] vákuum segítségével szűrünk át 1,4 kg olvadékot egy gyűjtőedénybe. A berendezés elektronikája ez idő alatt felveszi a szűrési görbét, azaz információt kapunk az egységnyi idő alatt átszívott fém mennyiségéről.

A Prefil készülékkel végzett olvadékminőség elemzés lényege:

- alján nyitott, szűrővel ellátott tégelyt légmentes térbe helyezünk;
- a légmentesen lezárt tér alá egy gyűjtőedényt teszünk, ide fogjuk átszívni az olvadékot (a gyűjtőedény alatt mérleg található);
- a tégelybe folyékony fémet öntünk, a gép érzékeli az olvadék hőmérsékletét;
- a tégelyt lezárjuk, vákuumot hozunk létre, és 1,4 kg tömegű fémet átszívunk az alsó gyűjtőedénybe;
- a berendezés ez idő alatt felveszi a szűrési görbét (egységnyi idő alatt átszívott fém mennyisége);
- a szűrőn fennmaradó fémből mikroszkópos vizsgálatra csiszolatot készítünk;

- mikroszkóp segítségével mennyiségi és minőségi elemzést végzünk a maradékfémből készült mikrociszolaton.

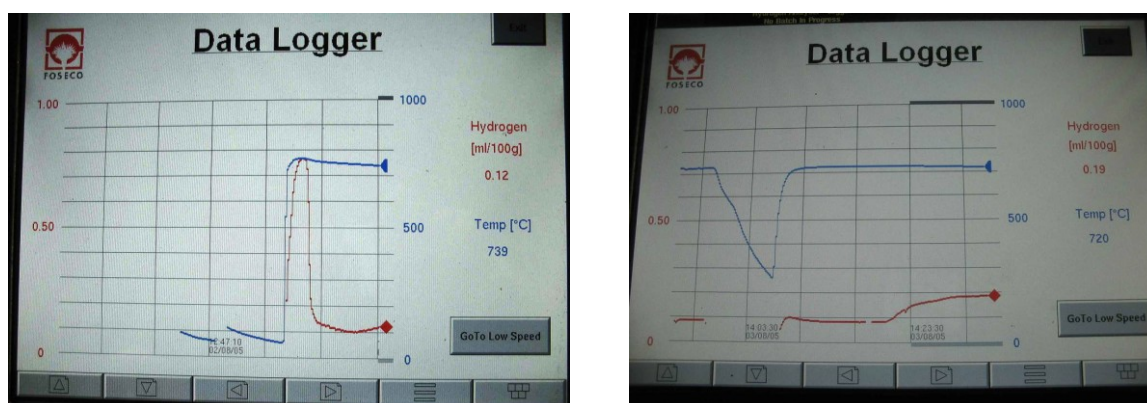
A szűrés görbék meredekségéből következtethetünk az olvadék tisztasági fokára, vagyis minél nagyobb a görbe meredeksége, annál tisztább az olvadék. Az oxidhártyák és egyéb durva kiválások befolyásolják a mérési diagram kezdeti meredekségét (20–30 sec.) [68]. A zárványok leülepedése abban az időpontban kezdődik, amikor a mérési diagram kezdeti meredeksége megváltozik [68]. Nagyméretű oxidszemcsék rövid idő alatt a Prefil-diagram ellaposodását eredményezik. Sok apró oxidrészecske jelenléte ezzel szemben a mérés kezdetén meredek diagramot eredményez, amely a mérés vége felé egyértelműen ellaposodik [73]. Aprószemcsés zárványok, mint pl. a TiB_2 , a finomszemcsés Al_2O_3 vagy a karbidok, megváltoztatják a görbe lineáris jellegét [68].

3.2. A sűrűség-index és az oldott hidrogén-tartalom közötti összefüggés vizsgálata és a vizsgálatok eredményei

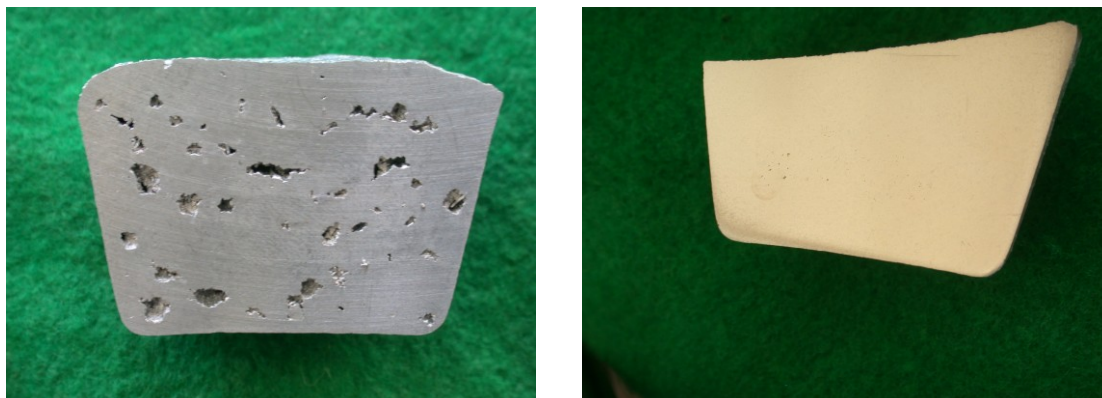
A szakirodalomban számos cikk található a hidrogéntartalom mérésével, meghatározásával kapcsolatban [6, 7, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 29, 33, 35, 36, 48, 63, 64, 65], ami alapján kijelenthető, hogy ez egy kikutatott terület. De nem találunk olyan kutatási beszámolót, cikket, amely azt tartalmazná, hogy a különböző hidrogéntartalom mérésére alkalmas berendezések mérési eredményei között milyen összefüggéseket lehet felállítani, ill. hogy a gyakorlatban melyik (direkt, indirekt) mérési módszer által szolgáltatott eredményekre támaszkodhatunk jobban. A szakirodalomban található többféle mérési módszer összekapcsolása további vizsgálatokat igényel, ezért a doktori disszertációmhöz kapcsolódó kutatás során párhuzamos méréseket végeztem Alspek H hidrogénszenzorral és a sűrűségindex meghatározására szolgáló berendezéssel többek között azért, hogy információt kapjunk arról, a hidrogénszondás direkt mérési eljárás valóban megbízható eredményt ad-e, és az üzemi felhasználhatóság szempontjából megfelelő-e?

3.2.1. Az alumínium-szilícium olvadékok hidrogéntartalmának vizsgálata a metallurgiai fázisban

Az olvadékok metallurgiai fázisban történő vizsgálata az olvasztókemencéből lecsapolt olvadék gáztalanító kezelésének vizsgálatát jelenti a hőntartó kemencébe történő kiszállítást megelőzően. A 19. ábra az Alspek H hidrogénszenzor által felvett görbét mutatja be, ami az oldott hidrogéntartalom változását mutatja gáztalanítás közben.



19. ábra. Az oldott hidrogéntartalom változása gáztalanító kezelés és felgázosítás közben Alspek H hidrogénszenzorral mérve



20. ábra. $AlSi7Mg(Sb)$ ötvözetből gáztalanítás előtt és után vett minta csiszolatának makroszkópikus felvétele

A 20. ábra jól mutatja, hogy a gáztalanítás előtt vett minta sok oldott gázt, ezáltal a csiszolata porozitást tartalmaz, míg a gáztalanítás után vett mintán csak elszórtan található kis méretű gázporozitás. A metallurgiai fázisban két különböző ötvözetet vizsgáltam, a vizsgált adagok adatait a 4. táblázat tartalmazza.

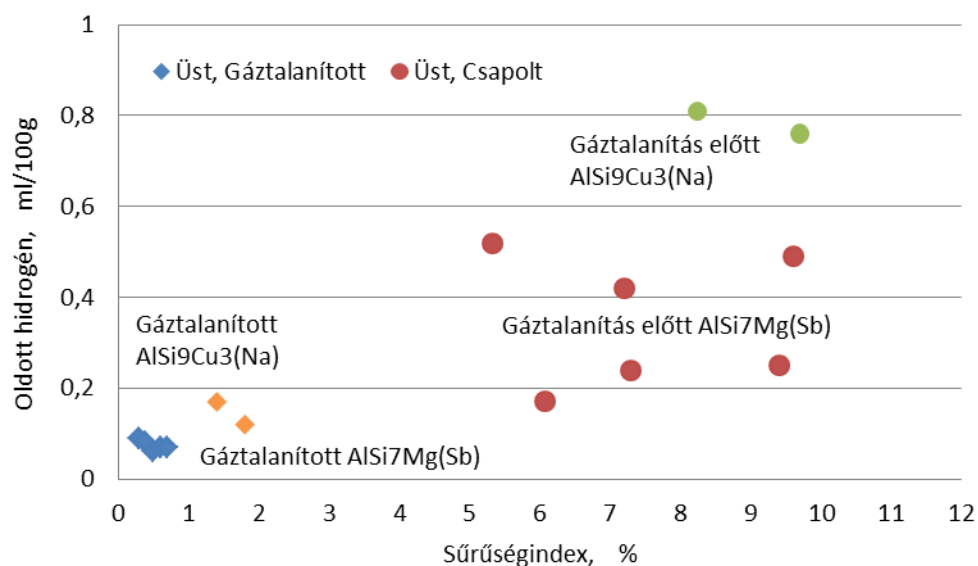
4. táblázat. Az olvadék gáztartalmának vizsgálata az olvasztás metallurgiai fázisában

Azonosító	Ötvözet	Az olvadék hőmérséklete, °C		Oldott hidrogén, ml/100g		Sűrűségindex, %	
		gázt. előtt	gázt. után	gázt. előtt	gázt. után	gázt. előtt	gázt. után
1.1	$AlSi7Mg(Sb)$			0,52	0,07	5,32	0,75
1.2				0,42	0,07	7,22	0,75
1.3		768		0,25	0,08	9,51	0,38
1.4		764		0,49		9,51	0,38
1.5		760	753	0,17	0,06	6,08	0,38
1.6		773	759	0,24	0,09	7,22	0,37
1.7	$AlSi9Cu3(Na)$	743				7,81	1,85
1.8		767		0,76	0,12	9,7	1,85
1.9		758	730	0,81	0,17	8,24	1,49

Üzemi körülmények között a két különböző típusú ötvözetet két különböző olvasztókemencében olvasztják meg. A gáztalanító berendezés működtetési paraméterei (fordulatszám, gázmennyiség) és a gáztalanítási idő (12 perc) mindkét ötvözet esetében azonosak voltak. A méréseket a kihordó üstben végeztem el, rotoros gáztalanítás előtt, ill.

után vettem a mintákat. Azt tapasztaltam, hogy a mért hidrogéntartalom értékeit nagyban befolyásolta az ötvözet típusa is.

A 21. ábrán az AlSi9Cu3(Na) és az AlSi7Mg(Sb) ötvözet sűrűségindex és oldott hidrogéntartalom értékeit mutatom be gáztalanítás előtt és után.



21. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változása gáztalanító kezelés hatására

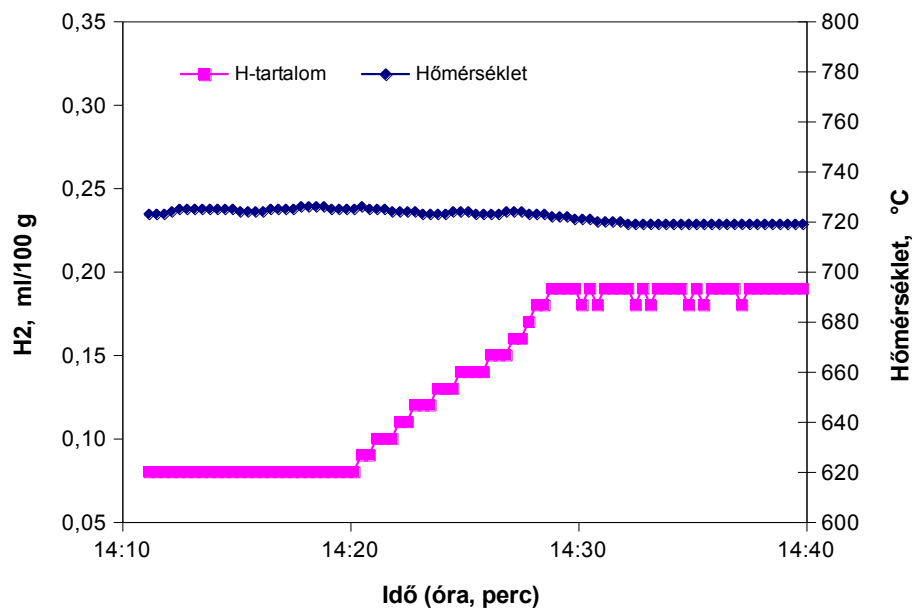
A 21. ábrán látható eredmények alapján megállapítható, hogy a gáztalanítás előtt a mért értékek mindkét ötvözet esetén nagy szórást mutatnak és széles tartományban mozognak, majd gáztalanítás közben lecsökkennek és ötvözetenként közel azonos értéket mutatnak.

3.2.2. A hőntartó kemencében tárolt olvadék hidrogéntartalmának vizsgálata

A hőntartó kemencében folyamatosan mértem az olvadék hidrogéntartalmát, az onnét vett mintákon a sűrűségindexet határoztam meg a beavatkozások hatásának kimutatására, azaz a gáztalanítás nélküli olvadék utánöntésének, valamint a stroncium és a formálógáz adagolás hatásának a vizsgálatát végeztem el. A stronciumadagolás hatásának vizsgálata azért volt fontos, mert szakirodalmi adatok alapján a stronciumos olvadék gázfelvevő képessége megnő. A formálógáz adagolásának célja az volt, hogy sok kis porozitás jöjjön létre egy nagy lunker helyett. A formálógáz összetételét tekintve nitrogén, amely mintegy 5% hidrogént tartalmaz. Adagolásával az olvadékokon olyan szándékos beavatkozásokat végeztünk, melyek üzemi körülmények között előfordulhatnak és növelik az olvadék gáztartalmát.

Megvizsgáltam a hőntartó kemencébe öntött és ott tárolt olvadék oldott hidrogéntartalmának a változását, melynek adatait az 5. táblázat tartalmazza. Az olvadékot teknő formájú, felülfűtéses, kétszebes hőntartó kemencéből vettem.

A hőntartó kemencébe kihordó üstből gáztalanítás nélküli olvadékot öntöttünk és folyamatosan mértük az oldott gáztartalmat. A gáztalanítás nélküli olvadékot tartalmazó üstből való utánöntés üzemi körülmények között előfordulhat, ezért volt fontos annak megállapítása, hogy mennyi gáztalanítás nélküli olvadék utánöntése okoz már selejtet. A 22. ábrán a gáztalanítás nélküli olvadék utánöntésének hatását mutatom be az oldott hidrogéntartalomra.



22. ábra. Gáztalanítás nélküli olvadék utánöntésének hatása az oldott hidrogéntartalomra

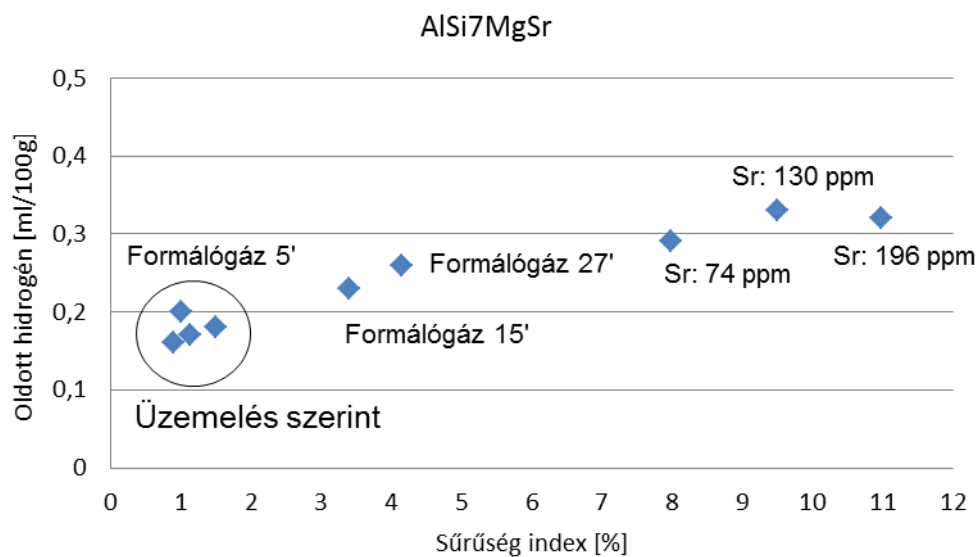
A gáztalanítás nélküli olvadék utántöltése addig történt, amíg a hidrogéntartalom be nem állt egy állandó, 0,24 ml/100g értékre. Ezt a hidrogénszenzorral való folyamatos méréssel ellenőriztük. Az ilyen gáztartalmú olvadékból már gázporozitációs öntvényt gyártanak.

5. táblázat. A hőntartó kemencében tárolt AlSi7Mg(Sb) ötvözet oldott hidrogéntartalma Alspek H készülékkel mérve, és a sűrűségindex vizsgálata

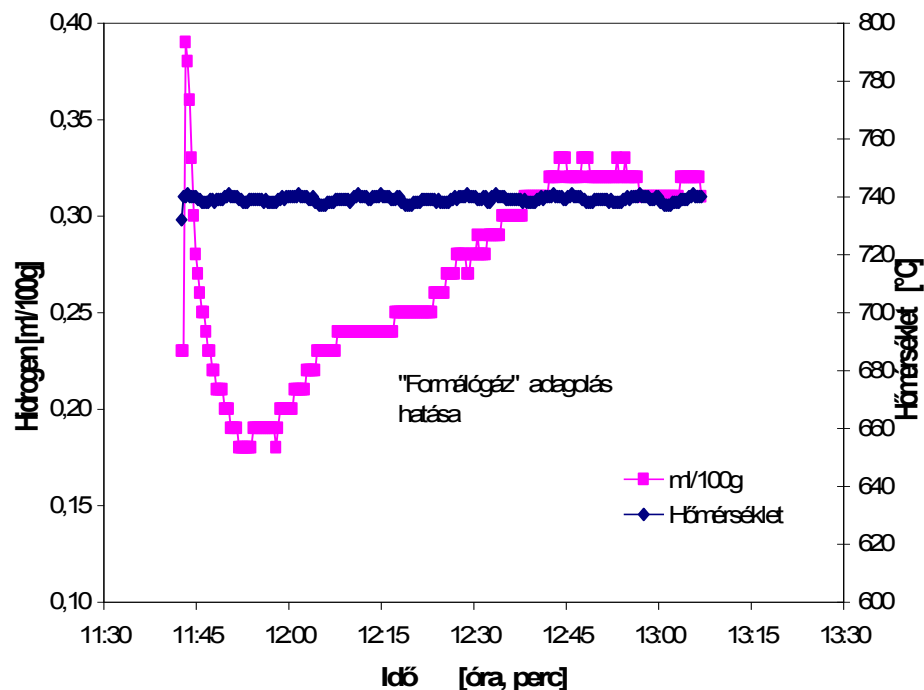
Azonosító	Megjegyzés	Olvadékhőm., °C	Oldott H-tart., ml/100g	Sűrűségindex
AlSi7Mg(Sb)				
2.1		740,0	0,19	2,63
2.2		742,0	0,18	1,88
2.3				1,88
2.4	utánöntés üstből			1,13
2.5	utánöntés utáni 3. min.	731,0	0,25	2,26
2.6	utánöntés 1. nem gáztalanított üstből	770,0		8,37
2.7	1. utánöntés után	728,0	0,21	3,01
2.8	utánöntés 2. nem gáztalanított üstből	760,0		8,78
2.9	2. utánöntés után közvetlenül	730,0	0,25	4,14
2.10	2. utánöntés utáni 10. min.	728,0		3,4

AlSi7Mg(Sr)				
2.11				1,87
2.12		738,0	0,17	1,13
2.13				1,5
2.14		739,0	0,16	0,75
2.15				1,87
2.16		738,0	0,17	1,13
2.17	formálógáz	740,0	0,18	1,5
2.18	formálógáz	738,0	0,2	0,75
2.19	formálógáz	740,0	0,23	3,4
2.20	formálógáz	744,0	0,26	4,15
2.21	+ 3 Sr-pálca	744,0	0,29	7,98
2.22	+ 3 Sr-pálca	738,0	0,32	10,98
2.23	+ 4 Sr-pálca		0,33	9,51

A 23. és 24. ábrán a formálógáz (nitrogén 5% hidrogén-tartalommal) bevitelének hatását mutatom be, amely jelentős oldott hidrogéntartalom és sűrűségindex növekedést okozott, ill. a nagyobb stronciumtartalom is magasabb értékeket eredményezett.



23. ábra. A formálógáz- és a stronciumadagolás hatása



24. ábra. A formálógáz adagolásának hatása

Az elvégzett kísérletek alapján a hidrogénszenzor előnyére írható, hogy folyamatosan mér és mutatja az eredményeket. Ezáltal megállapítható, hogy pl. túl sokáig végzett gáztalanítás esetén a hidrogéntartalom értéke emelkedik. Az Alspek H szondával mért hidrogéntartalom változás eredményeinek ismeretében megállapítható, hogy az olvadék gáztartalmának szándékos változtatását a mért eredmény megfelelően követi. További vizsgálatok szükségesek az üzemi alkalmazás eldöntéséhez, a különböző olvadékösszetétel és hőmérséklet hatásának feltárására, az öntvényhibát okozó általános érvényű határértékek meghatározására és alkalmazására.

3.3. A rotoros gáztalanítás hatékonyságának vizsgálata

A rotorokkal kapcsolatos fontos tudnivalókat a 3.2.3. fejezetben ismertettem. Itt a különböző rotorok és működtetési paraméterek gáztalanító hatásának vizsgálatáról számolok be különböző ötvözetek esetén. A rotorok más-más gyártótól származtak és eltérő geometriájúak voltak, amint az a 25. ábrán látható. A vizsgált ötvözetek a következők voltak: AlSi10Mg (233), AlSi9Cu3 (226.10) és AlSi8Cu3 (319).



„A” rotor



„B” rotor



„C” rotor

25. ábra. A vizsgált rotorfejek képei

3.3.1. Különböző rotorokkal végzett gáztalanítási kísérletek eredményei az ötvözettől függetlenül

A kísérletek adatait a 6–8. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. Az AlSi8Cu3 (319) ötvözet oldott hidrogéntartalmának mérési eredményei

Azonosító	Kezelés előtt			Kezelés után		
	Olvadék- hőm., °C	Oldott hidrogén, ml/100g	Sűrűség- Index, %	Olvadék- hőm., °C	Oldott hidrogén, ml/100g	Sűrűség- index, %
Rotor C, Kezelési idő: 15 min, fordulatszám: 520/min, nitrogéngáz-felhasználás: 17 l/min						
3.1			6,34	745	0,05	0,74
3.2	741	0,22	8,58	744	0,05	0,74
3.3	743	0,25	5,20	744	0,05	0,74
3.4	738	0,24	8,21	745	0,05	0,37
Rotor A, Kezelési idő: 8 min, fordulatszám: 370/min, nitrogéngáz-felhasználás: 20 l/min						
3.5	750	0,19	6,69	755	0,09	1,48
3.6	737	0,13	2,59	743	0,07	0,74
3.7	750	0,22	5,20	750	0,08	2,22
3.8	742	0,27	5,97	749	0,09	1,48
3.9	741	0,21	7,06	752	0,09	1,48
3.10	739	0,22	6,72	749	0,09	1,11
Rotor B, Kezelési idő: 15 min, fordulatszám: 450/min, nitrogéngáz-felhasználás: 20 l/min						
3.11			10,49			0,74
3.12	728		5,95	752	0,09	1,11
3.13	718	0,15	5,95	741	0,09	1,11
3.14	719	0,16	5,95	749	0,10	0,74
3.15	720	0,15	6,67	745	0,10	1,11
3.16	724	0,16	6,69	745	0,10	1,11
3.17	723	0,15	6,69	743	0,10	1,48
3.18	734	0,20	7,06	752	0,11	0,74
3.19	739	0,20	7,06	751	0,12	1,48
3.20	745	0,25	5,95	753	0,12	1,11
3.21	734	0,18	6,69	750	0,11	0,74
3.22	737	0,19	4,44	754	0,11	0,37
3.23	733	0,16	7,84	751	0,11	1,11
3.24	740	0,28	6,69	753	0,13	1,11
3.25	732		7,84	750	0,11	0,74
3.26	731	0,17	6,32	751	0,07	1,11
3.27	730	0,28	8,18	754	0,07	0,74
3.28	740	0,23	8,18	754	0,07	0,74
3.29	743	0,28	7,46	751	0,09	1,85
3.30	727	0,27	9,29	746	0,07	1,11
3.31	730	0,30	8,58	752	0,07	1,11

7. táblázat. Az AlSi9Cu3 (226.10) ötvözet oldott hidrogéntartalmának mérési eredményei

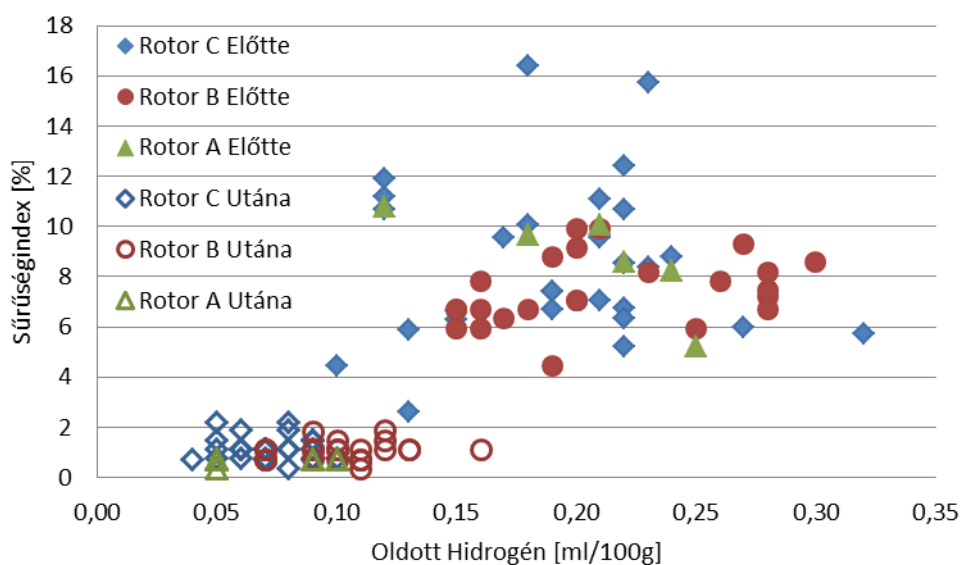
Azonosító	Kezelés előtt			Kezelés után		
	Olvadék- hőm., °C	Oldott hidrogén, ml/100g	Sűrűség- Index, %	Olvadék- hőm., °C	Oldott hidrogén, ml/100g	Sűrűség- index, %
Rotor C, Kezelési idő: 15 min, fordulatszám: 520/min, nitrogéngáz-felhasználás: 17 l/min						
5.1	726	0,21	10,04	736	0,09	0,74
5.2	711	0,12	10,78	714	0,09	0,74
5.3	730	0,18	9,67	741	0,10	0,74
Rotor A Kezelési idő: 10 min, fordulatszám: 400/min						
5.4	728	0,18	16,40	740	0,08	1,10
5.5	701	0,12	11,19	721	0,07	1,10
5.6	707	0,12	11,90	718	0,06	1,10
5.7	700	0,10	4,43	710	0,05	1,10
5.8	726	0,18	10,04	746	0,09	1,10
5.9	735	0,19	7,41	739	0,08	1,10
5.10	736	0,22	8,55	742	0,09	0,74

8. táblázat. Az AlSi10Mg (233) ötvözet oldott hidrogéntartalmának mérési eredményei

Azonosító	Kezelés előtt			Kezelés után		
	Olvadék- hőm., °C	Oldott hidrogén, ml/100g	Sűrűség- Index, %	Olvadék- hőm., °C	Oldott hidrogén, ml/100g	Sűrűség- index, %
Rotor A, Kezelési idő: 15 min, fordulatszám: 370/min						
4.1			6,46	750	0,08	1,13
4.2	750	0,32	5,70	749	0,06	1,13
4.3		0,24	8,78	749	0,06	1,13
4.4	720	0,23	8,40	743	0,05	0,75
Rotor A, Kezelési idő: 8 min, fordulatszám: 370/min, nitrogéngáz-felhasználás: 20 l/min						
4.5		0,32		750	0,09	0,75
4.6	758		9,54	749	0,06	0,75
4.7			8,37	752	0,07	1,13
4.8			10,31	749	0,07	1,13
4.9			8,75	750	0,07	0,75
4.10	745	0,21	9,54	749	0,06	1,13
4.11	749	0,17	9,54	751	0,07	1,13
4.12	744	0,22	10,69	749	0,06	1,89
4.13	744	0,21	11,07	750	0,08	1,89
4.14	737		13,79	747	0,07	1,13

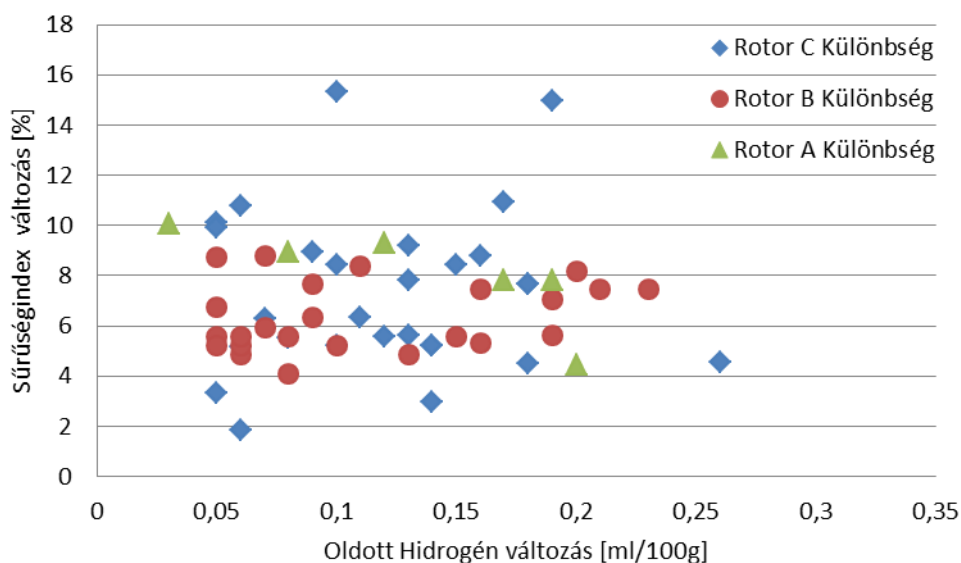
Rotor A, Kezelési idő: 8 min, fordulatszám: 420/min						
4.15	716	0,12	10,66	726	0,07	0,73
4.16	714	0,13	5,90	725	0,07	0,73
4.17	722	0,15	6,27	725	0,07	0,73
4.18	725	0,15	6,64	735	0,08	0,37
Rotor B, Kezelési idő: 15 min, fordulatszám: 450/min, nitrogéngáz-felhasználás: 20 l/min						
4.19	742	0,20	9,16	745	0,09	0,76
4.20	748	0,19	8,78	749	0,10	1,14
4.21	752	0,28	7,22	748	0,12	1,89
4.22		0,21	9,89	740	0,16	1,13
4.23	742	0,20	9,92	747	0,13	1,14

A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom vizsgálati eredményeinek kapcsolatát a 26. ábrán mutatom be.



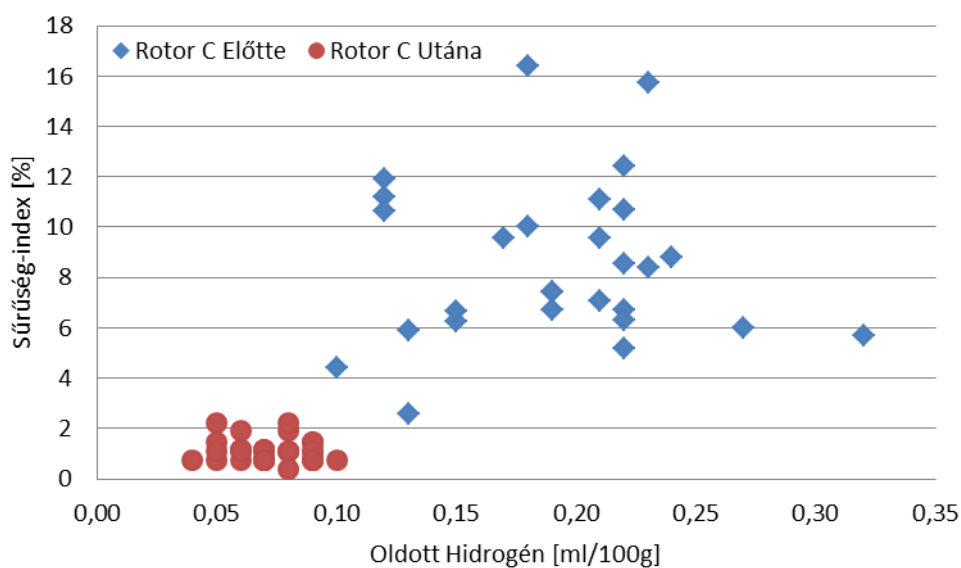
26. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom értékei olvadékezelés előtt és után a vizsgált ötvözetek esetén

A 26. ábrán látszik, hogy a gáztalanító kezelés hatékony volt, a gáztalanítás utáni sűrűségindex értékek 2% alá kerültek. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom olvadékezelés előtti és utáni értéke közötti különbség összefüggését a 27. ábrán mutatom be. Megállapítható, hogy az oldott hidrogéntartalom változása széles tartományban található.



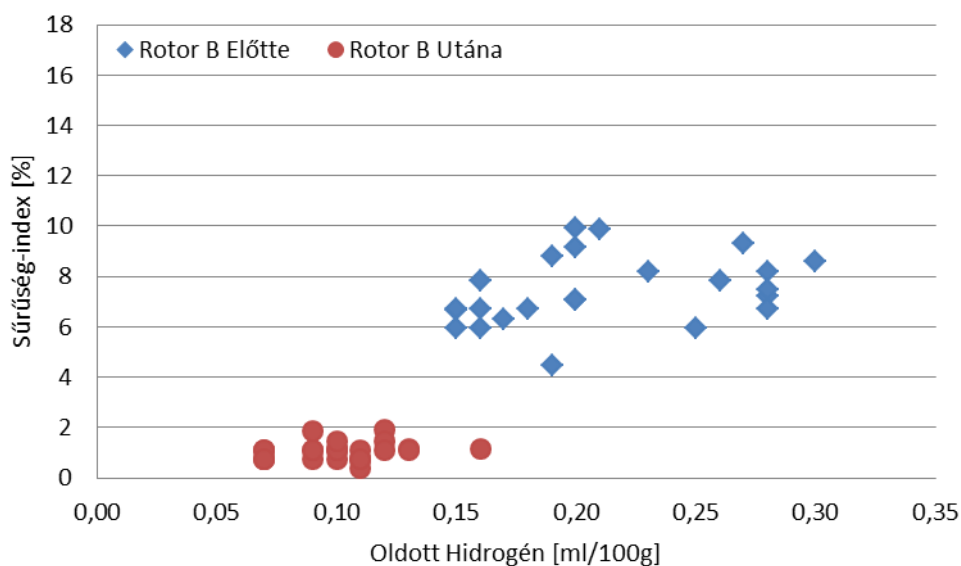
27. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom különbsége az olvadékezelés előtt és után a vizsgált ötvözetek esetén

A „C” rotor gáztalanító hatásának vizsgálati eredményeit a 28. ábrán mutatom be.



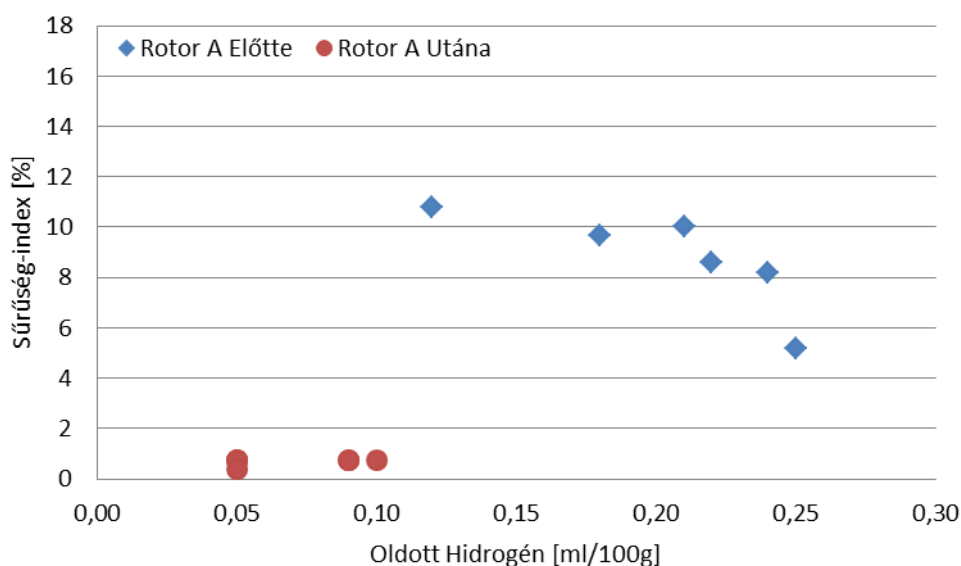
28. ábra. A „C” rotorral végzett gáztalanítás során kapott eredmények olvadékezelés előtt és után

Megállapítható, hogy a kezelés előtt mért adatok nagy szórást mutatnak, de a „C” rotor alkalmazásával végzett kezelés után kapott eredményekre már igaz, hogy minden sűrűségindex érték 2 % alatt helyezkedik el és 0,05 és 0,1 ml/100g között van az oldott hidrogéntartalom. A „B” rotor gáztalanító hatásának vizsgálati eredményeit a 29. ábrán mutatom be.



29. ábra. A „B” rotorral végzett gáztalanítás során kapott eredmények olvadékezelés előtt és után

Megállapítható, hogy a „B” rotor alkalmazásával a kezelés után kapott eredmények mind a 2 % sűrűségindex érték alatt helyezkednek el és 0,07 és 0,17 ml/100g között vannak az oldott hidrogéntartalom eredmények. Az „A” rotor gáztalanító hatásának vizsgálati eredményeit a 30. ábrán mutatom be.

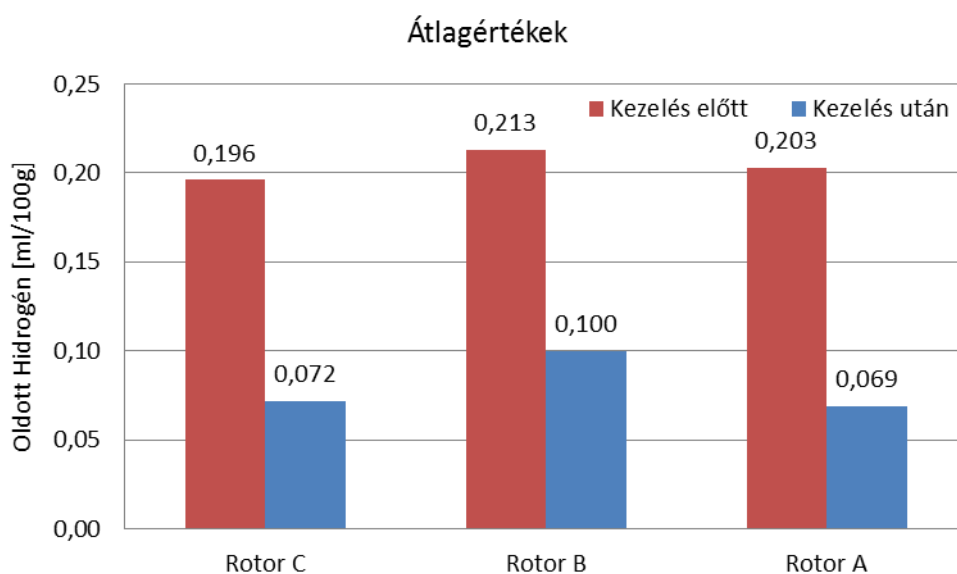


30. ábra. Az „A” rotorral végzett gáztalanítás során kapott eredmények olvadékezelés előtt és után

A kapott sűrűségindex és oldott hidrogéntartalom értékek együttes vizsgálatával nehéz a rotorok hatékonyságát megállapítani, mivel különböző ötvözetek és különböző gépbeállítási paraméterek mellett végeztük az üzemi vizsgálatokat, melyek jelentősen befolyásolják a kapott eredményeket. Ezért a továbbiakban az oldott hidrogéntartalom és a sűrűségindex eredmények átlagértékeinek összehasonlítását végeztem el a különböző rotorok esetén. Az oldott hidrogéntartalom mérési eredmények átlagértékeit a 9. táblázat és a 31. tartalmazza.

9. táblázat. Az Alspek H hidrogénszenzorral mért oldott hidrogéntartalmak átlagértékei

	Alspek H hidrogénszenzorral mért hidrogéntartalom, ml/100g			
ROTOR	Kezelés előtt	Kezelés után	Különbség	Változás, %
Rotor C	0,196	0,072	0,124	63,3
Rotor B	0,213	0,100	0,113	53,1
Rotor A	0,203	0,069	0,132	65,0

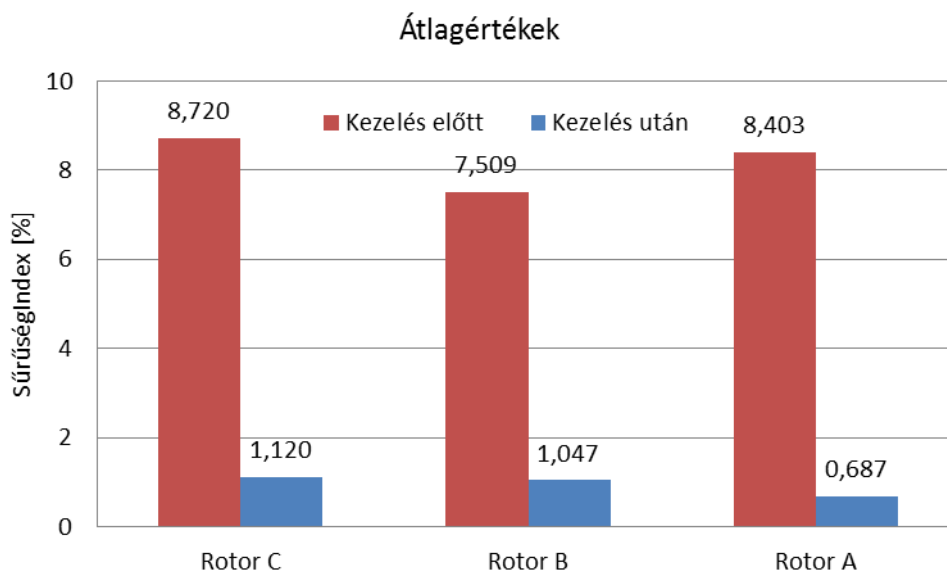


31. ábra. Az oldott hidrogéntartalom átlagértékei olvadékezelés előtt és után

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy kezelés előtt és kezelés után is a legnagyobb oldott hidrogéntartalom értékeket a „B” rotor esetén mértünk. Kezelés után az oldott hidrogéntartalom átlageredményei alapján az „A” rotor tűnik a leghatékonyabbnak, de a százalékban mért legnagyobb változás, ha minimális mértékben is, a kezelés előtti és utáni eredmények alapján a „C” rotorhoz kapcsolódik. A sűrűségindex mérési eredmények átlagértékeit a 10. táblázat és a 32. ábra tartalmazza.

10. táblázat. A sűrűségindex mérések átlagértékei

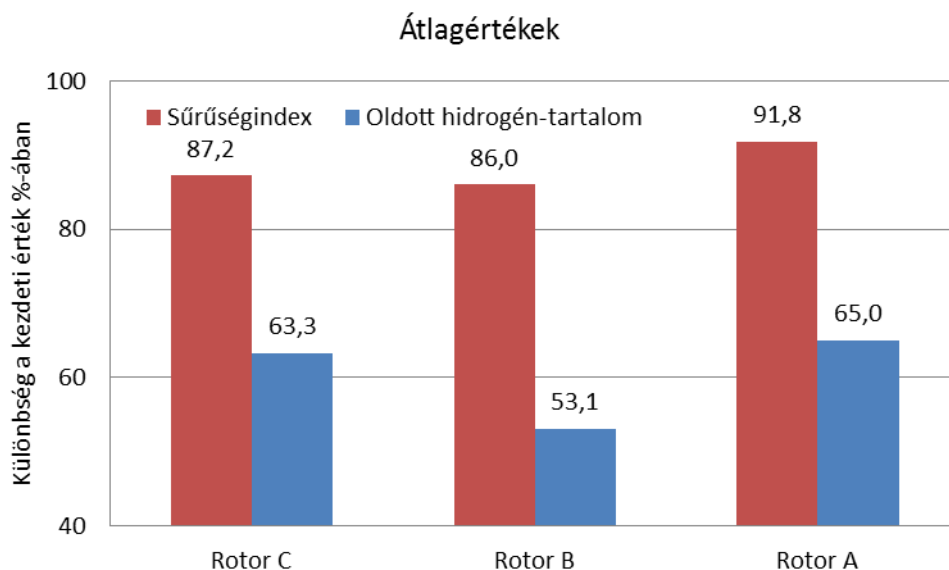
ROTOR	Sűrűségindex, %			
	Kezelés előtt	Kezelés után	Különbség	Változás, %
Rotor C	8,72	1,12	7,60	87,2
Rotor B	7,51	1,05	6,46	86,0
Rotor A	8,40	0,69	7,71	91,8



32. ábra. A sűrűségindex mérések átlagértékei olvadékezelés előtt és után

A sűrűségindex vizsgálati eredmények alapján megállapítottam, hogy a kezelés után is a legnagyobb sűrűségindex átlagértékeket a „C” rotor esetén mértem. A sűrűségindex átlageredményei alapján az „A” rotor tűnik a leghatékonyabbnak, és a százalékban mért legnagyobb változás a kezelés előtti és utáni eredmények alapján is az „A” rotorhoz kapcsolódik. Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy az „A” rotorral végeztük a legkevesebb mérést a legkevesebb változtatás mellett.

A megfelelő összehasonlítás érdekében vizsgáltuk a gáztalanítás hatékonyságát a mért jellemző változása alapján. A 33. ábrán és a 11. táblázatban a sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változását mutatom be a kezelés előtti érték százalékában.



33. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom relatív változása a gáztalanító kezelés előtti és utáni értékek különbsége alapján

11. táblázat. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változása a gáztalanító kezelés közben, a kezelés előtti és utáni értékek és a különbségük

ROTOR	Oldott H-tartalom kezelés előtt, ml/100g	Oldott H-tartalom kezelés után, ml/100g	Oldott H ₂ változás, ml/100 g	Oldott H ₂ változás a kezelés előtti %- ában	SI kezelés előtt, %	SI kezelés után, %	SI változás, %	SI változás a kezelés előtti %- ában
Rotor C	0,196	0,072	0,124	63,3	8,720	1,120	7,570	87,2
Rotor B	0,213	0,100	0,112	53,1	7,509	1,047	6,463	86,0
Rotor A	0,203	0,069	0,132	65,0	8,403	0,687	7,716	91,8
Összes	0,203	0,082	0,120	60,5	8,206	1,047	7,146	88,3

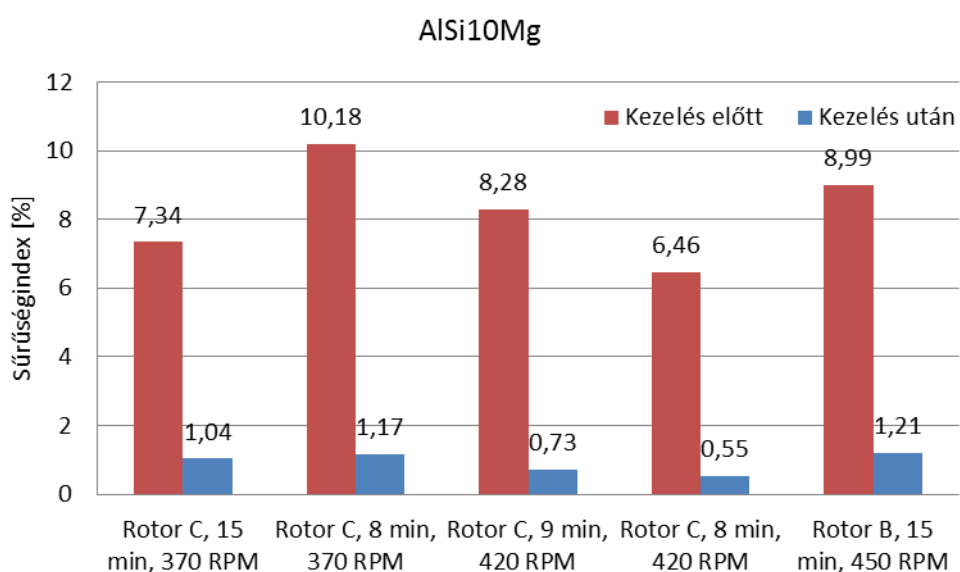
A mért eredmények változása alapján a sűrűségindex értékek szerint az „A” rotor, az oldott hidrogéntartalom szerint az „A” és a „C” rotor hatásfoka a kedvezőbb.

3.3.2. A rotoros gáztalanítás paramétereinek hatása különböző ötvözetek olvadáskor minőségére

Az eltérő ötvözetek hatását az AlSi10Mg (233) és az AlSi8Cu3 (319) jelű ötvözet esetén mutatom be. A 12. táblázatban a sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változását mutatom be a kezelés előtti érték százalékában AlSi10Mg ötvözet esetén. Az AlSi10Mg ötvözet esetén mért sűrűségindex mérési eredményeket a 34. ábra, az oldott hidrogéntartalom mérési eredményeket a 35. ábra tartalmazza.

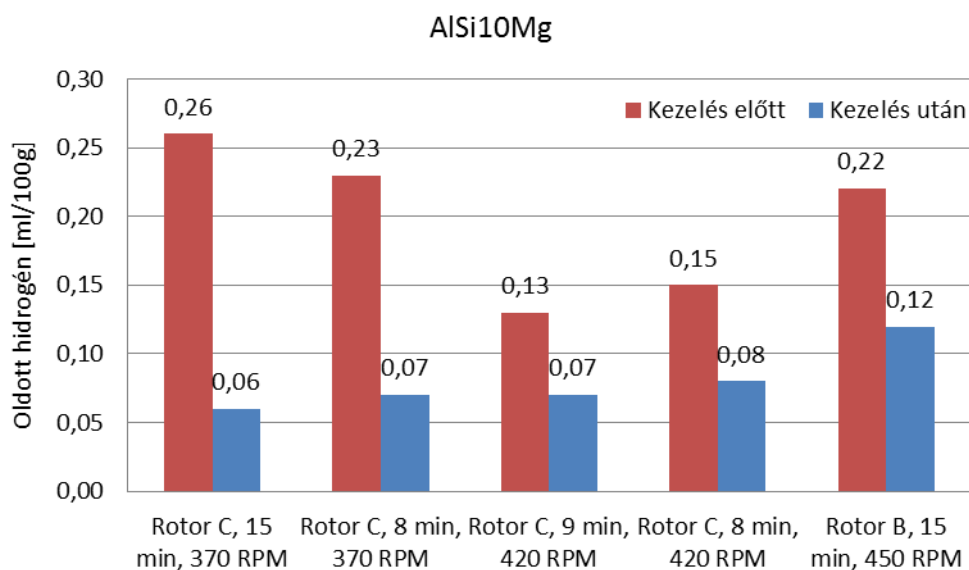
12. táblázat. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változása a gáztalanító kezelés közben, a kezelés előtti és utáni értékek és a különbségük AlSi10Mg ötvözet esetén

AlSi10Mg	Oldott H-tartalom kezelés előtt, ml/100g	Oldott H-tartalom kezelés után, ml/100g	Oldott H ₂ változás, ml/100 g	Oldott H ₂ változás a kezelés előtti %-ában	SI kezelés előtt, %	SI kezelés után, %	SI változás, %	SI változás a kezelés előtti %-ában
Rotor C, 15 min, 370 RPM	0,26	0,06	0,21	80,8	7,34	1,04	6,30	85,2
Rotor C, 8 min, 370 RPM	0,23	0,07	0,15	65,2	10,18	1,17	7,99	88,0
Rotor C, 9 min, 420 RPM	0,13	0,07	0,06	46,2	8,28	0,73	7,55	90,4
Rotor C, 8 min, 420 RPM	0,15	0,08	0,08	53,3	6,46	0,55	5,91	91,4
Rotor B, 15 min, 450 RPM	0,22	0,12	0,10	45,5	8,99	1,21	7,78	85,9



34. ábra. A sűrűségindex változása kezelés előtt és után AlSi10Mg ötvözet esetén

AlSi10Mg típusú ötvözet esetén a sűrűségindex kezelés előtti és kezelés utáni értékei összefüggést mutatnak, mivel a magasabb kiinduló értékek esetén nagyobb értéket mértünk a kezelés után is. A C'' rotorral a legjobb eredményt 8 perc kezelési idő és 420 fordulat/perc mellett sikerült elérnünk, de fontos megemlíteni, hogy a kezelés előtti értékek ebben az esetben voltak a legalacsonyabbak.



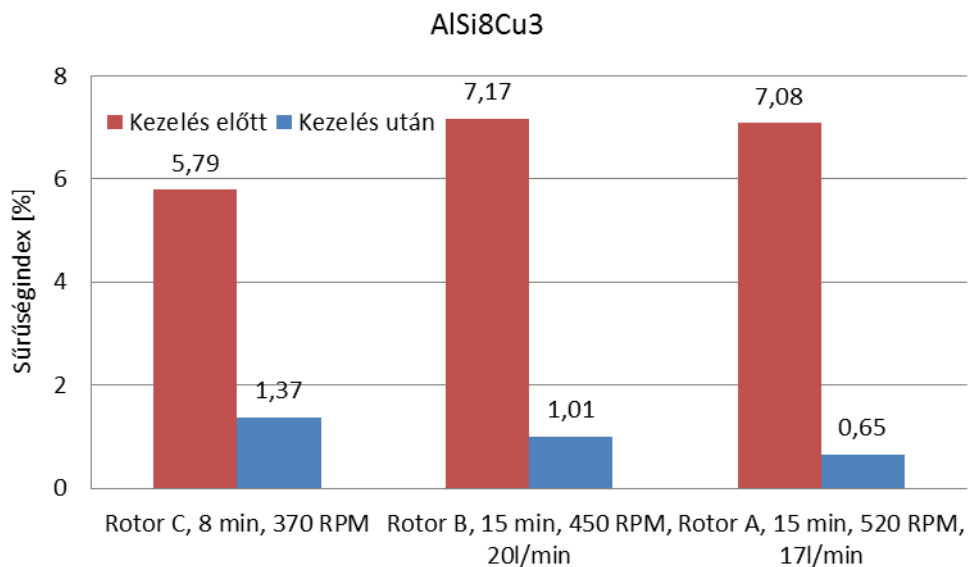
35. ábra. Az oldott hidrogén változása kezelés előtt és után AlSi10Mg ötvözet esetén

AlSi10Mg típusú ötvözet esetén az oldott hidrogéntartalom mérési eredményekre kevésbé jellemző, hogy a nagyobb kezelés előtti értékekhez nagyobb kezelés utáni értékek tartoznak. A „C” rotorral a legjobb eredményt a 15 perc kezelési idő és 370 fordulat/perc mellett sikerült elérni. Látható, hogy ebben az esetben voltak a kezelés előtti értékek a legnagyobbak.

A 13. táblázatban a sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változását mutatom be a kezelés előtti érték százalékában AlSi8Cu3 ötvözet esetén. Az AlSi8Cu3 ötvözet esetén mért sűrűségindex mérési eredményeket a 36. ábra, az oldott hidrogéntartalom mérési eredményeket a 37. ábra tartalmazza.

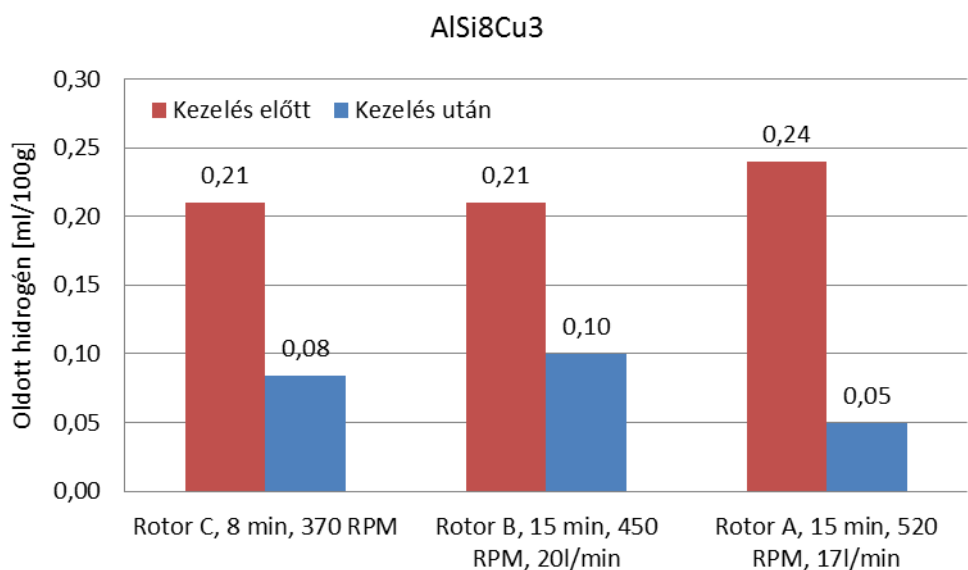
13. táblázat. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom változása a gáztalanító kezelés közben, a kezelés előtti és utáni értékek és a különbségük AlSi8Cu3 ötvözet esetén

AlSi8Cu3	Oldott H-tartalom kezelés előtt, ml/100g	Oldott H-tartalom kezelés után, ml/100g	Oldott H ₂ változás, ml/100 g	Oldott H ₂ változás a kezelés előtti %-ában	SI kezelés előtt, %	SI kezelés után, %	SI változás, %	SI változás a kezelés előtti %-ában
Rotor C, 8 min, 370 RPM	0,21	0,08	0,12	59,0	5,79	1,37	4,42	75,2
Rotor B, 15 min, 450 RPM, 20l/min	0,21	0,10	0,12	57,1	7,17	1,01	6,16	85,6
Rotor A, 15 min, 520 RPM, 17l/min	0,24	0,05	0,19	79,2	7,08	0,65	6,44	90,3



36. ábra. A sűrűségindex változása kezelés előtt és után AlSi8Cu3 ötvözet esetén

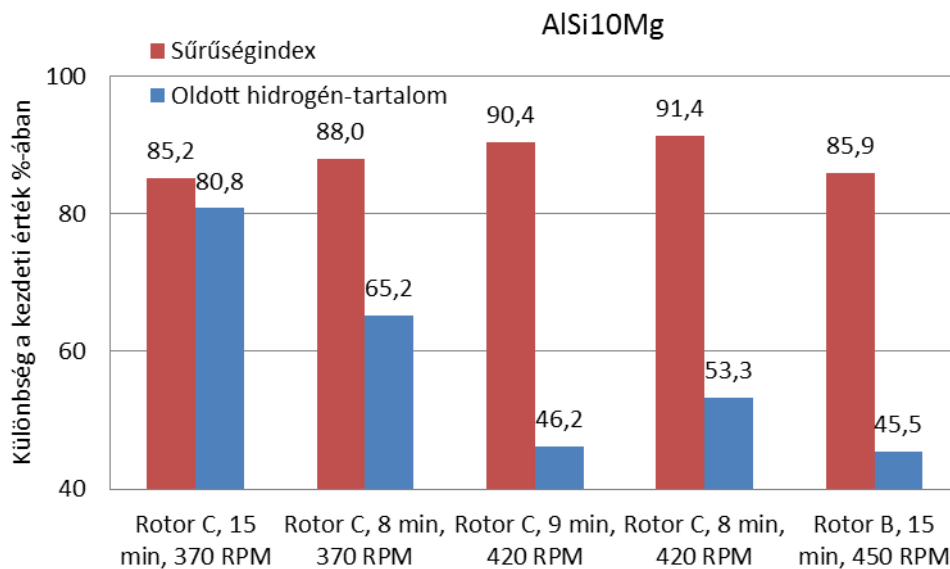
AlSi8Cu3 típusú ötvözet esetén a sűrűségindex értékek alapján a legjobb eredményt az „A” rotorral 15 perc kezelési idő és 520 fordulat/perc mellett sikerült elérni.



37. ábra. Az oldott hidrogén változása kezelés előtt és után AlSi8Cu3 ötvözet esetén

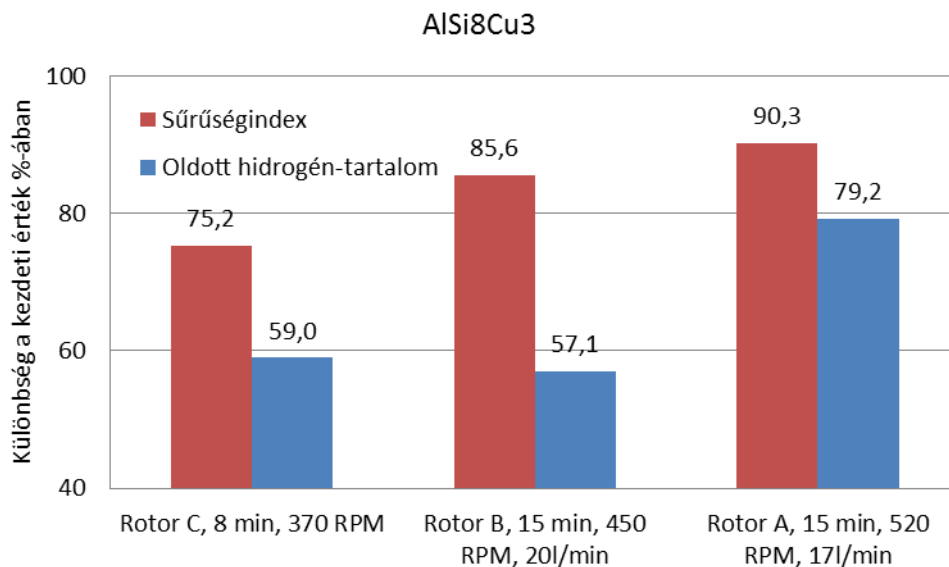
AlSi8Cu3 típusú ötvözet esetén az oldott hidrogéntartalom értékek alapján „A” rotorral 15 perc kezelési idő és 520 fordulat/perc mellett kaptuk a legjobb eredményt, és ebben az esetben volt a legnagyobb a kezelés előtt mért oldott hidrogéntartalom is.

A sűrűségindex és az oldott hidrogén mérési eredmények különbségének a kezdeti értékhez viszonyított arányát AlSi10Mg ötvözet esetén a 38. ábra, az AlSi8Cu3 ötvözet esetén a 39. ábra tartalmazza.



38. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogén mérési eredmények különbségének a kezdeti értékhez viszonyított aránya AlSi10Mg jelű ötvözet esetén

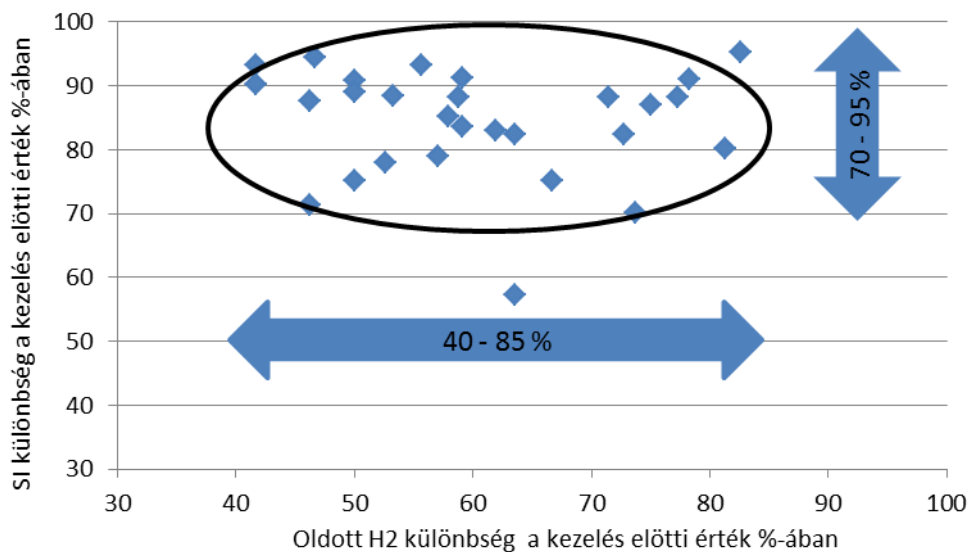
Az AlSi10Mg típusú ötvözet esetén a sűrűségindex értékek szerint a legjobb eredményeket „C” rotorral 8 perc kezelési idő és 420 fordulat/perc mellett kaptuk, tehát ennek a rotornak a legjobb a hatásfoka. Az oldott hidrogéntartalom változása alapján a legjobb eredményeket a „C” rotorral 15 perc kezelési idő és 370 fordulat/perc mellett kaptuk.



39. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogén mérési eredmények különbségének a kezdeti értékhez viszonyított aránya AlSi8Cu3 ötvözet esetén

Az AlSi8Cu3 típusú ötvözet esetén a sűrűségindex értékek változása alapján a legjobb eredményeket az „A” rotorral 15 perc kezelési idő és 520 fordulat/perc mellett kaptuk, tehát ennek a rotornak a legjobb a hatásfoka. Az oldott hidrogéntartalom változása szerint a legjobb eredményeket az „A” rotorral 15 perc kezelési idő és 520 fordulat/perc mellett kaptuk.

A 40. ábrán a sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom gáztalanító kezelés közben elért különbségét mutatom be a kezelés előtti érték százalékában.



40. ábra. A sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom gáztalanító kezelés közben elért különbsége a kezelés előtti érték százalékában

A 40. ábra alapján sűrűségindex eredmények esetén a változás tartománya 70–95 % között, míg oldott hidrogéntartalom eredmények esetén a változás tartománya 30–80 % között van.

A vizsgálati eredmények alátámasztják azt a korábbi megállapításunkat, miszerint a sűrűségindex mérési eredmények különbségének nagyobb aránya miatt a minőségjavulást érzékenyebben mutatják ki, mint az oldott hidrogén mérési eredmények. A gáztalanítás hatékonysága szempontjából az a megoldás tekinthető kedvezőbbnek, amelyikkel azonos paraméterek mellett nagyobb változás mutatható ki.

A vizsgált rotorok gáztalanítási hatékonysága eltérő a sűrűségindex és az oldott hidrogéntartalom mérési eredmények változása alapján. A különböző ötvözetek kezelés előtti sűrűségindex értékei között sincs számottevő különbség. A sűrűségindex változásában nincs jelentős különbség a vizsgált rotorok között. A sűrűségindex változása a kezdeti értékhez viszonyítva 85–90%. A gáztalanítás utáni sűrűségindex értékek minden esetben megfelelnek a hibamentes öntvénygyártási követelményeknek (sűrűségindex <2%). A fentiek alapján megállapítható, hogy a sűrűségindex vizsgálat az üzemi minőségellenőrzés jól használható módszere.

Az oldott hidrogén mérési eredmények változásában jelentős különbség van a vizsgált olvadékok és rotorok között. A gáztalanítás előtti oldott hidrogén mérési eredmények tág határok között változnak (0,10–0,32 ml/100g), egyes olvadékok gáztalanítás előtti értékei

azonosak más olvadékok gáztalanítás utáni értékeivel. A gáztalanítás utáni értékek között is jelentős a különbség (0,04–0,10 ml/100g), és az eredmények szórása kétszerese a sűrűségindex mérési eredmények szórásának. Az oldott hidrogén változása a kezdeti értékhez viszonyítva 45–80%. Az oldott hidrogén változásában nagyobb eltérések vannak, mint a sűrűségindex esetén a vizsgált rotorok és működtetési paraméterek között.

Az üzemi vizsgálatok során nem volt lehetőség a befolyásoló paraméterek egyenkénti és többlépcsős, teljes körű változtatására. Az elvégzett vizsgálatok eredményei szerint az oldott hidrogén változása a kisebb fordulatszám és hosszabb gáztalanítási idő alkalmazása esetén kedvezőbb. A vizsgálati eredmények alapján nem lehet kijelölni olyan oldott hidrogén határértéket, mely alapján eldönthető, hogy az megfelelően biztosítja a hibamentes öntvénygyártás követelményeit.

3.4. A gáztalanító kezelés hatása az olvadék zárványtartalmára

Ahogy azt korábban leírtam, jelenleg a szakirodalom és a nemzetközi szakma véleménye szerint [39, 73] nincs megfelelő módszer a zárványosság üzemi körülmények között alkalmazható gyors és egyszerű kimutatására, ezért az olvadék zárványtartalmának csökkentésénél is csak útkeresés folyik.

A jelenlegi vizsgálati módszerek (Prefil, PoDFA, LIMCA) közül a Prefil ad eredményt egyedül a vizsgálat elvégzése közben (átfolyási sebesség, átfolyt tömeg), az így kapott eredmények viszont nem csak a zárványtartalom eltéréséből eredően különböznek és adódnak, hanem az olvadék más fizikai-kémiai tulajdonságai is nagymértékben befolyásolják a folyamatot. Jelentős szerepe van az olvadék gáztalanításának és a szemcsefinomító, valamint a módosító adalékok hatásának, amelyek befolyásolják az olvadék viszkozitását, határfelületi tulajdonságait, ezáltal megváltoztatják a szűrőn átfolyó olvadék mennyiségét és az átfolyás viszonyait.

Probléma az is, hogy egyelőre nincs olyan vizsgálati módszer, amely bemutatná az egyes befolyásoló tényezők hatását az átfolyási görbére. A szűrőn fennmaradó zárványok utólagos vizsgálata, kiértékelése hosszadalmas és költséges, de elengedhetetlen a berendezések által szolgáltatott eredmények megértéséhez és kiegészítéséhez. A 3.2.5. fejezetben mutattam be a Prefil berendezést és működési elvét. A kísérletek során AlSi8Cu3 (319), AlSi7Mg (356) és AlSi5Cu3 (LM 22) ötvözetet vizsgáltunk. Az AlSi8Cu3 típusú ötvözet esetén a módosítóanyag-tartalom 200–250 ppm stroncium, az AlSi7Mg típusú ötvözet esetén 1200 ppm antimon, míg az AlSi5Cu3 típusú ötvözet esetén 80 ppm stroncium volt.

3.4.1. A 200-250 ppm stronciumot tartalmazó AlSi8Cu3 ötvözzel végzett mérések

Üzemi körülmények között használt AlSi9Cu3 és AlSi8Cu3 minőségű, 150 ill. 200 ppm körüli stronciumot tartalmazó ötvözetekhez adagolt 50 ppm stroncium-többség esetén vizsgált minták eredményeiből levonható az a következtetés, hogy a mikroszkópi szövetvizsgálat és a számítógépes képelemzés eredményei alapján a szövetszerkezetben nem okozott jelentős különbségeket a többség stroncium, tehát az eutektikum módosítotttsága – az eltérő stronciumtartalom ellenére – közel azonos mértékű volt [85].

Ugyanezen kísérletsorozatban az AlSi10 ötvözetből származó, mintegy 300 ppm stronciumot tartalmazó mintákban sikerült azonosítani stronciumos vegyületfázisokat, úgymint az $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ vegyületfázist a scanning elektronmikroszkópi vizsgálat és a mikroszondás analízis során [85]. Fontos megjegyezni, hogy ezen kísérletsorozatban az olvadékon nem hajtottak végre nitrogénes gáztalanító kezelést. Az ötvözetekben jelenlévő stronciumos vegyületfázisoknak azért van jelentősége, mert az ilyen vegyületben kötött stroncium nem tudja kifejteni az eutektikus szilíciumra gyakorolt jótékony, módosító hatását [85]. Az AlSi8Cu3 ötvözetrel végzett kísérletek adatait a.

A Hiba! A hivatkozási forrás nem található., 42. ábra Hiba! A hivatkozási forrás nem található. és 44. ábra tartalmazza a 200–250 ppm stronciumtartalmú AlSi8Cu3 ötvözet esetén a Prefil-készülékkel kapott eredményeket, azaz a szűrőn átfolyt tömeget az idő függvényében gáztalanítás előtt, közvetlenül gáztalanítás után, valamint gáztalanítást és hőntartást követően.

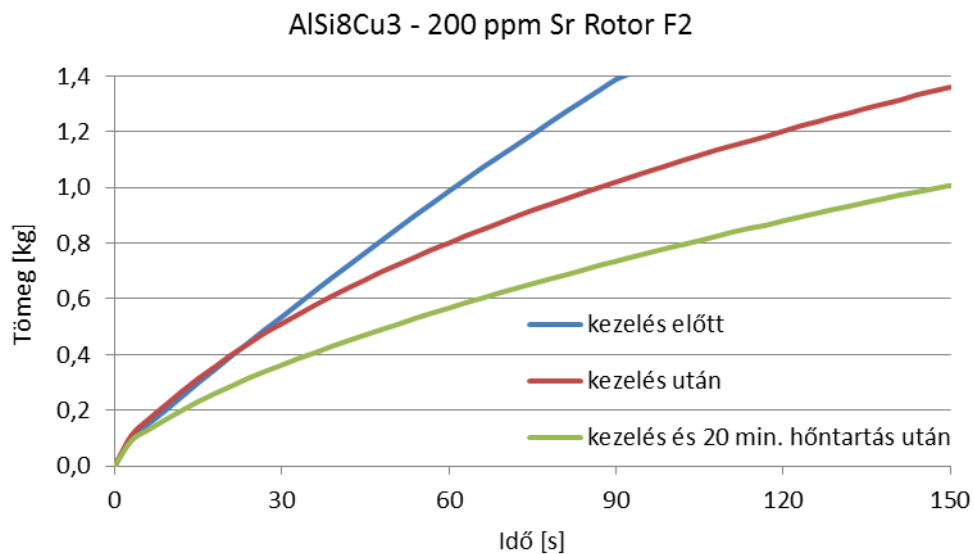
14. táblázat tartalmazza.

A Hiba! A hivatkozási forrás nem található., 42. ábra Hiba! A hivatkozási forrás nem található. és 44. ábra tartalmazza a 200–250 ppm stronciumtartalmú AlSi8Cu3 ötvözet esetén a Prefil-készülékkel kapott eredményeket, azaz a szűrőn átfolyt tömeget az idő függvényében gáztalanítás előtt, közvetlenül gáztalanítás után, valamint gáztalanítást és hőntartást követően.

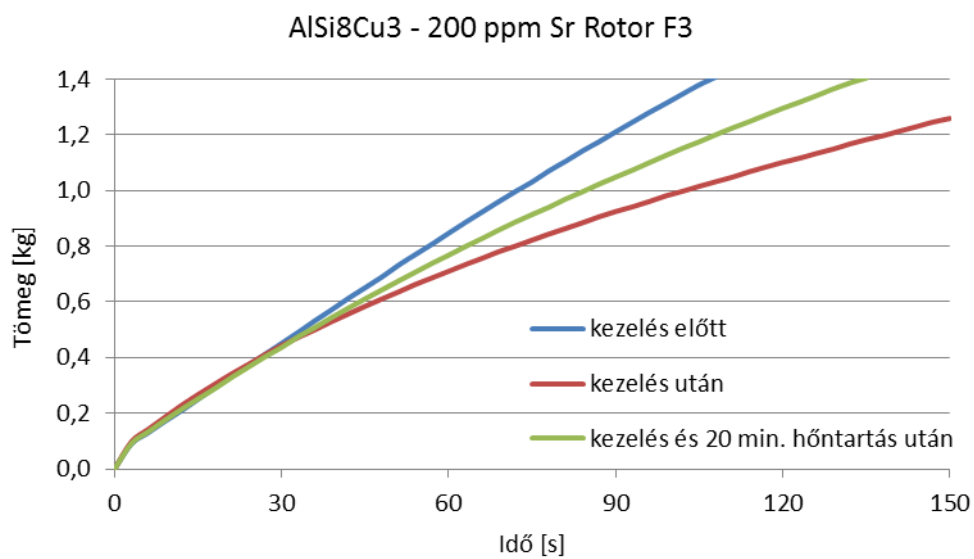
14. táblázat. Hőntartó kemencéből vett AlSi8Cu3 ötvözet Prefil-készülékkel végzett vizsgálata

AlSi8Cu3 ötvözet (stronciumtartalom 200–250 ppm)				
Azonosító	A szűrés időtartama, [s]	Az átszűrt fém tömege, [kg]	Átszűrt fém/ időtartam, [g/s] *	Körülmények
4.1	114	1,409	12,36	Utánöntés. A gáztalanító kezelés előtt nem történt Sr-adagolás. Várakozási idő: 10 perc.
4.2	113	1,403	12,42	Mintavétel a gáztalanító kezelés után 15 perccel. Sr-rudak és tisztítósó adagolás közvetlenül a gáztalanítás előtt.
4.3	94	1,412	15,02	Utánöntés. Sr-adagolás salaklehúzás és tisztítósó adagolás nélkül. Várakozási idő: 15 perc.
4.4	150	1,360	9,07	Utánöntés, mintavétel közvetlenül a gáztalanító kezelést követően. Sr-rudak és tisztítósó adagolás közvetlenül a gáztalanítás előtt.
4.5	150	1,008	6,72	Mintavétel a gáztalanítást követő 20. percben.
4.6	108	1,408	13,04	Utánöntés, mintavétel 15 perccel később. Salaklehúzás tisztítósó adagolás nélkül. Nincs Sr-adagolás és várakozási idő.
4.7	150	1,259	8,39	Mintavétel közvetlenül a gáztalanító kezelés után. Sr-rudak és tisztítósó adagolás közvetlenül a gáztalanítás előtt.
4.8	135	1,404	10,4	Mintavétel a gáztalanító kezelés után 20 perccel.
4.9	102	1,411	13,83	Utánöntés. Mintavétel stroncium és tisztítósó adagolás nélkül.
4.10	150	1,383	9,22	Mintavétel közvetlenül a gáztalanító után. Gáztalanítás előtt Sr és tisztítósó adagolás.
4.11	134	1,405	10,49	Mintavétel a gáztalanító kezelés után 15-20 perccel.
4.12	105	1,415	13,48	Utánöntés. Várakozási idő: 20 perc
4.13	150	1,408	9,39	Mintavétel közvetlenül a gáztalanító kezelés után. Sr és tisztítósó adagolás közvetlenül a kezelés előtt.
4.14	103	1,410	13,69	Mintavétel 20 perccel a gáztalanító kezelést követően.
4.15	99	1,403	14,17	Utánöntés. Nincs Sr-adagolás.
4.16	150	1,149	7,66	Mintavétel közvetlenül a gáztalanító kezelés után. Sr és tisztítósó adagolás közvetlenül a kezelés előtt.
4.17	136	1,407	10,35	Mintavétel 20 perccel a gáztalanító kezelést követően.

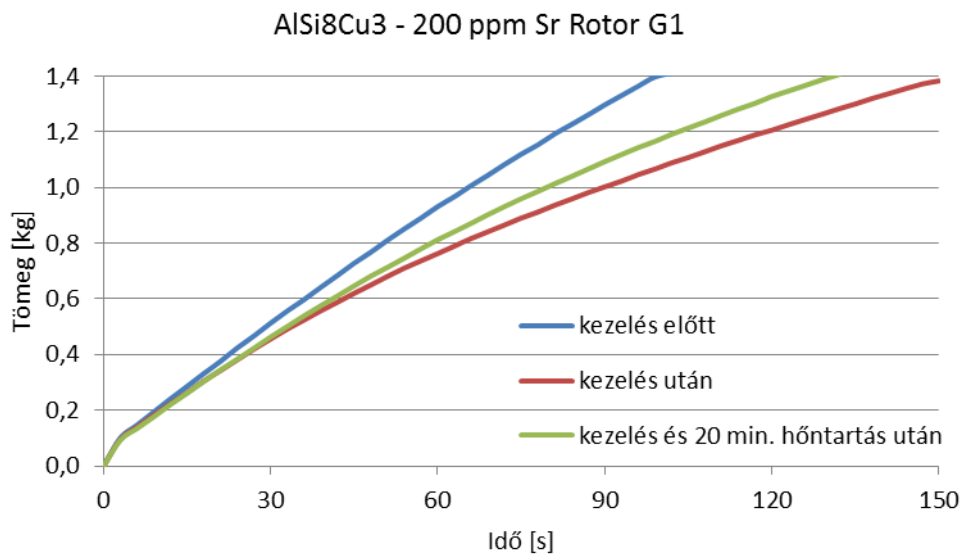
* – Átlagos átfolyási sebesség, [g/s]



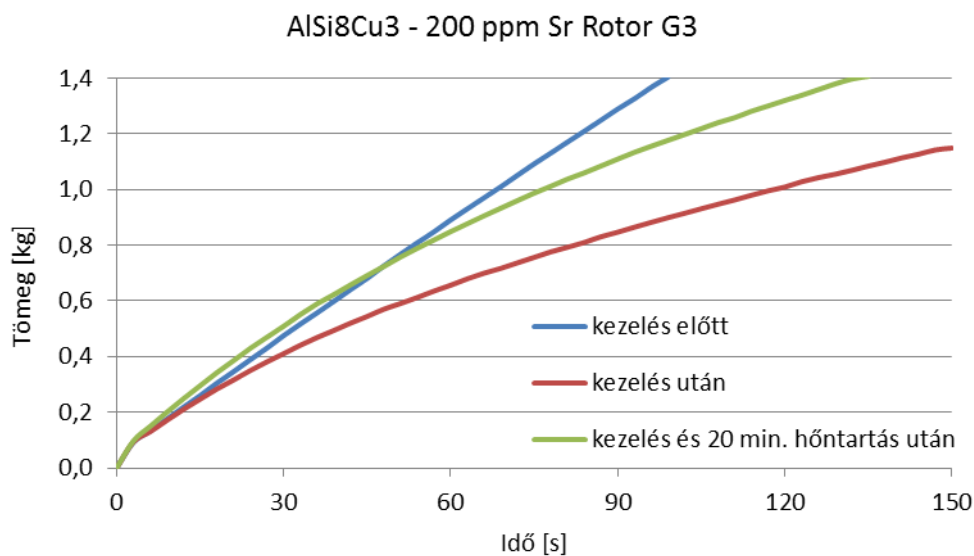
41. ábra. A 4.3, 4.4 és 4.5 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi



42. ábra. A 4.6, 4.7 és 4.8 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi



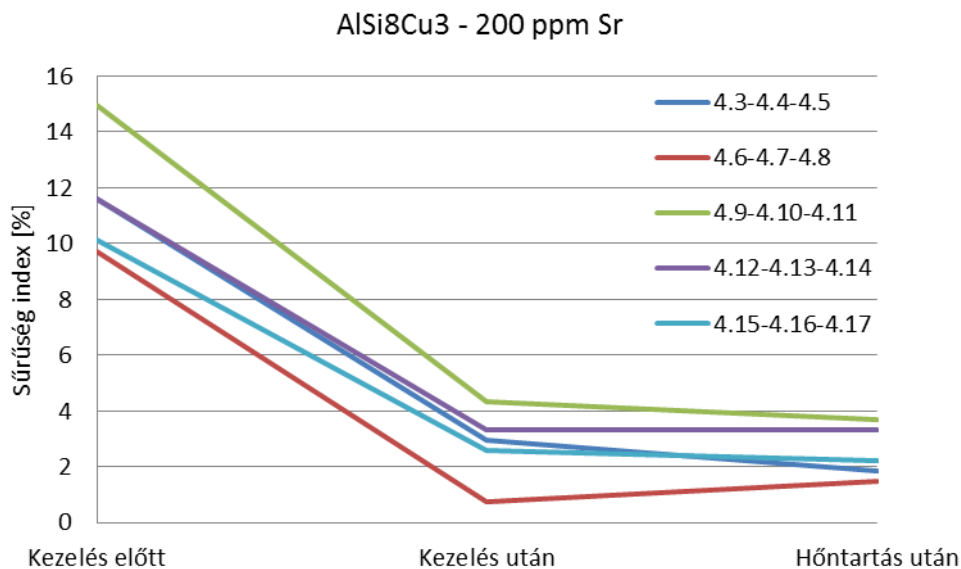
43. ábra. A 4.9, 4.10 és 4.11 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi



44. ábra. A 4.15, 4.16 és 4.17 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi

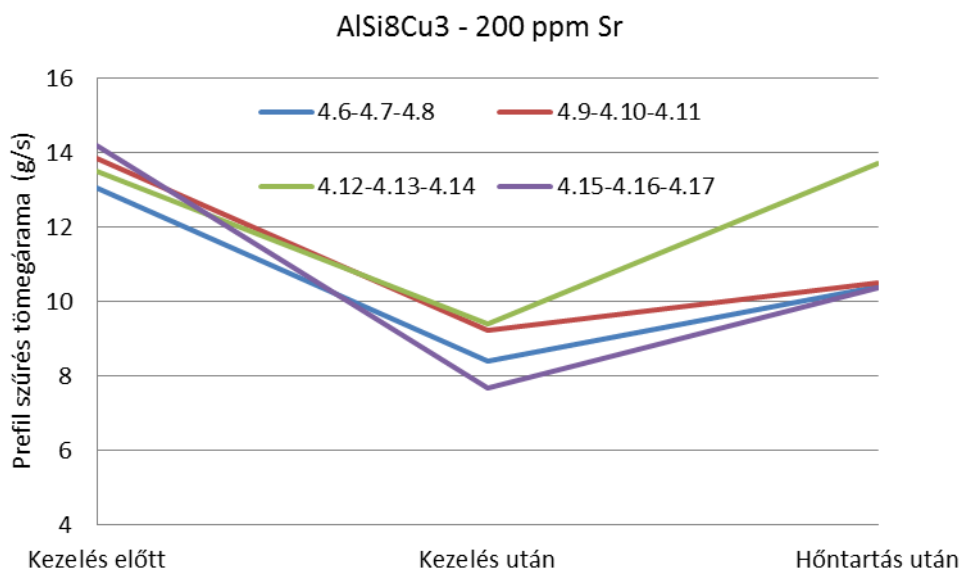
Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a gáztalanító kezelés utáni olvadék átfolyási tulajdonságai rosszabbak. A gáztalanítást követő 20 min. hőntartás hatására az átfolyási tulajdonságok további romlása figyelhető meg a 41. ábrán, a többi esetben a hőntartást követően az átfolyási tulajdonságok javultak.

A 45. ábra a 200–250 ppm stronciumtartalmú AlSi8Cu3 ötvözet esetén mért sűrűségindex értékeket ábrázolja gáztalanítás előtt, közvetlenül gáztalanítás után és 20 perc hűntartást követően.



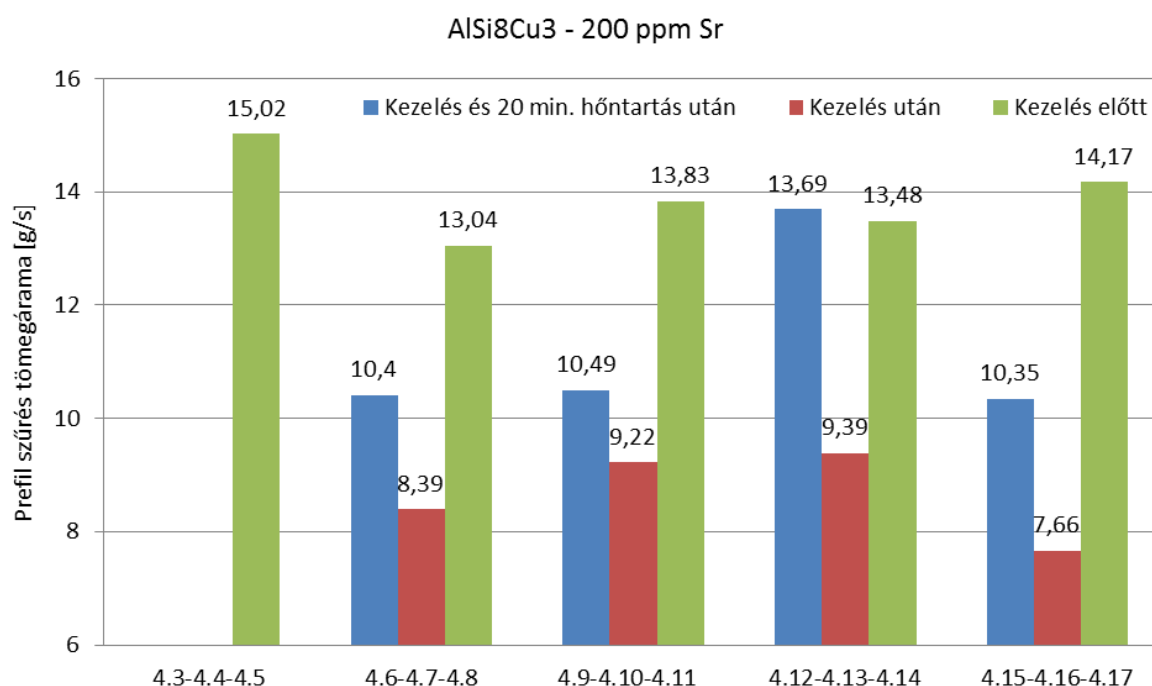
45. ábra. A sűrűségindex és az olvadékezelés összefüggése

A 46. ábra mutatja a 200–250 ppm stronciumtartalmú AlSi8Cu3 ötvözet esetén a Prefil-készülékkel kapott eredményeket, azaz a szűrőn átfolyt tömegáramot (átfolyt tömeg/idő) gáztalanítás előtt, közvetlenül gáztalanítás után, és 20 perc hűntartást követően.



46. ábra. A Prefil-készülékkel mért átfolyási viszonyok változása a gáztalanító kezelés hatására

A 47. ábrán a Prefil-készülékkel mért átlagos átfolyási sebesség és az olvadékkezelés összefüggését mutatom be.



47. ábra. A Prefil-készülékkel mért átlagos átfolyási sebesség és az olvadékkezelés összefüggése

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a gáztalanító kezelés utáni sűrűségindex alapján az olvadék gáztartalma megfelelő, de a gáztalanító kezelést követően rosszabbak a Prefil-készülékkel mért átfolyási sebesség értékei.

A Prefil-készülékkel mért átlagos átfolyási sebesség tömegáramának (g/s) nagyobb értékei mutatják a nagyobb olvadéktisztaságot. A vizsgálatok során a gáztalanítás előtti olvadék vizsgálatokor kaptam a nagyobb értékeket.

Megállapítottam, hogy a sűrűségindex és a Prefil-készülékkel mért átlagos átfolyási sebesség között nincs szoros kapcsolat.

A szilícium morfológiáját a stroncium kémiai kötött vagy kevésbé kötött állapota befolyásolja [84]. A módosításért felelős stroncium kétféle formában fordulhat elő. Egy könnyebben oldható, kémiai módszerekkel egyszerűbben támadható (híg sósavas eljárással) atomosan oldott, és egy kötöttebb, kevésbé oldható vegyület, amelyik csak erőteljes, salétromsav–hidrogénfluoridos oldási eljárás hatására vihető oldatba. Ebben a kevésbé oldható formában a stroncium vegyületet képez a szilíciummal, amely az Sr_2Si képlettel

írható le. A módosításban a kémiaiag kevésbé kötött, atomosan oldott stroncium vesz részt, míg a vegyületet képző stroncium nem játszik szerepet [84]. Az elvégzett vizsgálatok során a Prefil-készülékkel végzett szűrési módszert alkalmaztam. A nitrogénes gáztalanító kezelés hatására olyan zárványok keletkeztek, melyek az olvadék átfolyási tulajdonságait megváltoztatták.

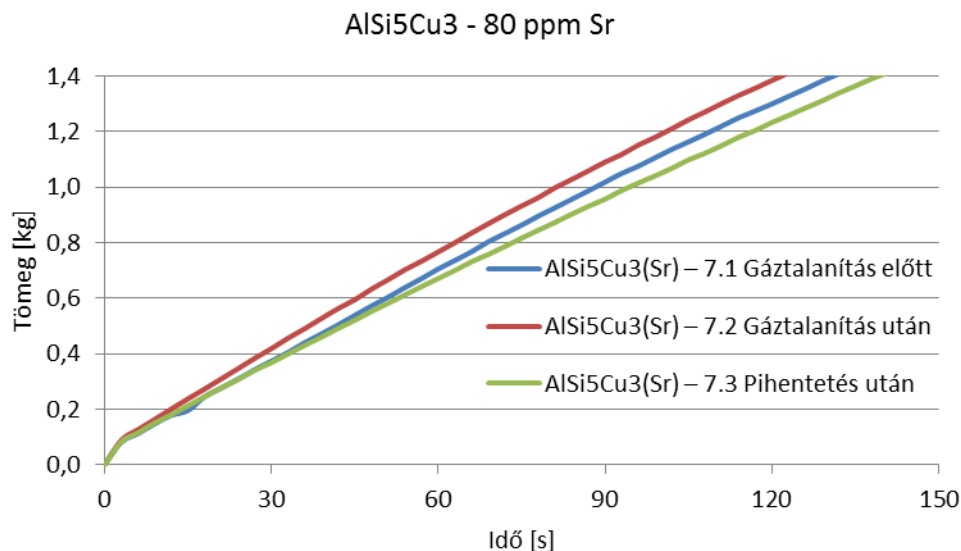
3.4.2. A 80 ppm stronciumot tartalmazó AlSi5Cu3 ötvözzel végzett mérések eredményei

Üzemi viszonyok között alacsony stronciumtartalom mellett végeztem kontrollvizsgálatot olyan ötvözzel, amely 80 ppm stronciumot tartalmazott. Az alacsonyabb módosítóanyag-tartalom adagolását az is indokolja, hogy a több stronciumot tartalmazó olvadék gázfellevő képessége megnő. A 15. táblázat tartalmazza az AlSi5Cu3 ötvözet esetében a Prefil-készülékkel nyert minták eredményeit.

15. táblázat. A kihordó üstből és hőntartó kemencéből Prefil-készülékkel nyert minták-eredményei AlSi5Cu3 ötvözet esetében

AlSi5Cu3 ötvözet (80 ppm stroncium)					
Azonosító	Időtartam, [s]	Az átszűrt fém tömege, [kg]	Sűrűségindex, [%]	Átszűrt fém/ Időtartam [g/s]	Megjegyzés
7.1	132	1,4074	1,88	10,66	mintavétel gáztalanítás előtt
7.2	123	1,4111	0,00	11,47	mintavétel gáztalanítás után
7.3	141	1,4125	0,37	10,02	mintavétel gáztalanítás után
7.4	150	1,243	0,74	8,29	mintavétel gáztalanítás és hőntartás után
7.5	150	1,107	1,11	7,38	mintavétel helye: zseb
7.6	150	1,179	1,11	7,86	mintavétel: utánöntés után

Az AlSi5Cu3 ötvözetből vett 7.1, 7.2 és 7.3 próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéit a 48. ábrán mutatom be.



48. ábra. A 7.1, 7.2 és 7.3 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi

A 80 ppm stronciumot tartalmazó AlSi5Cu3 olvadék esetén a gáztalanító kezelésnek nincs jelentős hatása az átfolyási viszonyokra. A gáztalanítás után az átfolyási tulajdonságok jobbakként, mint a kezelés előtti olvadék esetén. A gáztalanítást követő hőntartás hatására az átfolyási tulajdonságok kismértékű romlása figyelhető meg.

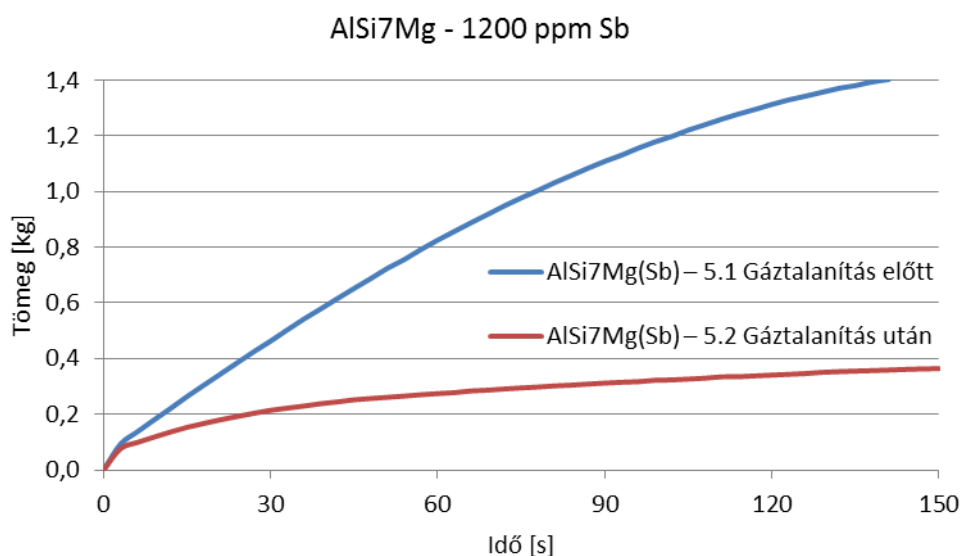
3.4.3. Az 1200 ppm antimont tartalmazó AlSi7Mg ötvözzel végzett mérések eredményei

Üzemi körülmények között alkalmazott, magas módosítóanyag-tartalmú ötvözzel is végeztem kontrollvizsgálatot. Olyan AlSi7Mg ötvözetet vizsgáltam Prefil berendezéssel, mely 1200 ppm antimont tartalmazott. Az elvégzett kísérletek adatait a 16. táblázat tartalmazza.

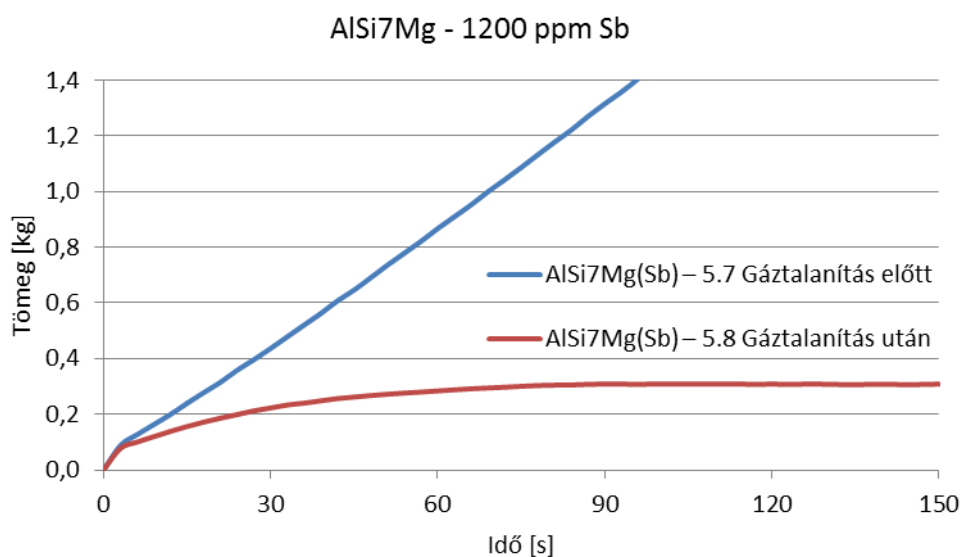
16. táblázat. A kihordó üstből és hőntartó kemencéből Prefil-készülékkel nyert minták eredményei AlSi7Mg ötvözet esetében

AlSi7Mg ötvözet (1200 ppm antimon)					
Azonosító	Időtartam, [s]	Az átszűrt fém tömege, [kg]	Sűrűség-index, [%]	Átszűrt fém / Időtartam, [g/s]	Megjegyzés
5.1	141	1,4022	1,52	9,94	mintavétel gáztalanítás előtt
5.2	150	0,3639	0,38	2,43	mintavétel gáztalanítás után
5.3	150	1,3199	7,63	8,8	mintavétel gáztalanítás előtt
5.4	150	0,9926	0,00	6,62	mintavétel gáztalanítás után
5.5	96	1,4051	7,2	14,64	mintavétel gáztalanítás előtt
5.6	150	0,3082	0,38	2,05	mintavétel gáztalanítás után
5.7	150	0,4200	0,00	2,8	mintavétel a beöntés előtt
5.8	150	0,3520	0,00	2,35	mintavétel a beöntés után
5.9	150	0,8760	0,76	5,84	mintavétel a beöntés után 15 perccel

Az AlSi7Mg(Sb) ötvözet Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéit a 49. és az 50. ábrán mutatom be.



49. ábra. Az 5.1 és 5.2 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi



50. ábra. Az 5.7 és 5.8 jelű próbák Prefil-készülékkel felvett átfolyási görbéi

Az elvégzett vizsgálatok alapján az antimonos olvadéokra is jellemző, hogy a gáztalanító kezelés után lecsökken az olvadék átfolyási sebessége.

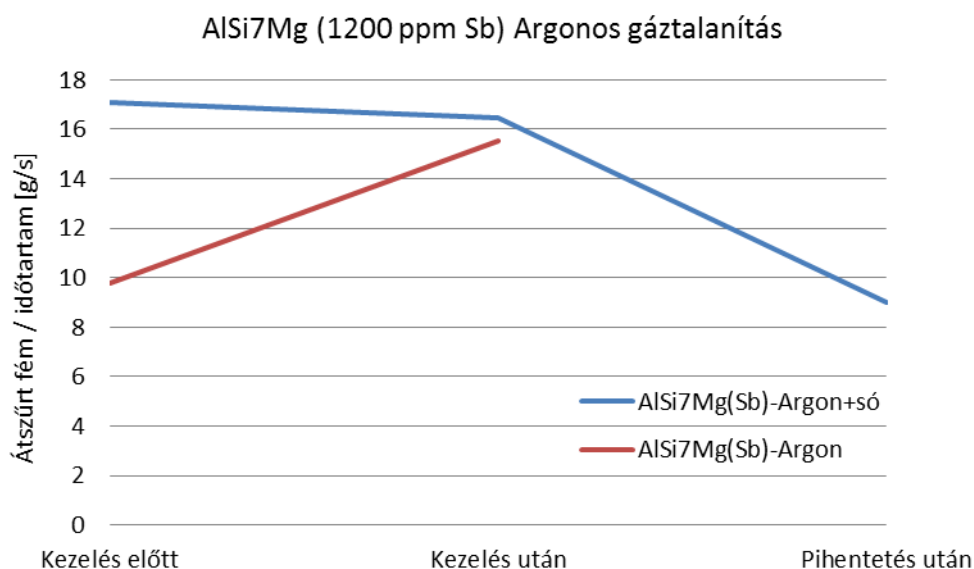
3.4.4. Az 1200 ppm antimont tartalmazó AlSi7Mg ötvözzel végzett mérések eredményei argonnal történő gáztalanítás esetén

Az AlSi7Mg ötvözet esetén Prefil-készülékkel végeztünk méréseket nem csak nitrogénes, hanem argonos rotoros gáztalanító kezelést követően is. Az argonos vizsgálatok hátterét az szolgáltatta, hogy a nitrogénnel végzett rotoros gáztalanító kezeléssel kapott eredmények azt mutatták, hogy a gáztalanító kezelés után rosszabbak az olvadék szűréssel minősített átfolyási tulajdonságai, ezért ennek a kontrollvizsgálatára végeztem el olyan kísérleteket, ahol nitrogén helyett argonnal történik a gáztalanítás. Az argon nemesgáz, amely nem lép reakcióba más elemekkel, nem úgy, mint a nitrogén. Az eredményeket a 17. táblázat tartalmazza.

17. táblázat. Az AlSi7Mg ötvözet Prefil-készülékkel kapott eredményei argonos gáztalanítás esetén

AlSi7Mg ötvözet (1200 ppm antimon)					
Azonosító	Időtartam, [s]	Az átszűrt fém tömege, [kg]	Sűrűség-Index, [%]	Átszűrt fém / Időtartam, [g/s]	Megjegyzés
6.1	82,6	1,413	6,44	17,11	kihordó üst, mintavétel: argonos gáztalanítás előtt
6.2	85,3	1,403	0,75	16,45	kihordó üst, mintavétel: argonos gáztalanítás, tisztító só adagolás után
6.3	150,1	1,352	1,52	9,01	kihordó üst, mintavétel: argonos kezelést követően, pihentetés után
6.4	143,1	1,401	1,89	9,79	kihordó üst, mintavétel: argonos gáztalanítás előtt
6.5	90,6	1,409	0,00	15,55	kihordó üst, mintavétel: argonos gáztalanítás után, sóadagolás nélkül

Az 51. ábra tartalmazza az argonos gáztalanítást követően kapott átfolyási sebesség eredményeket.



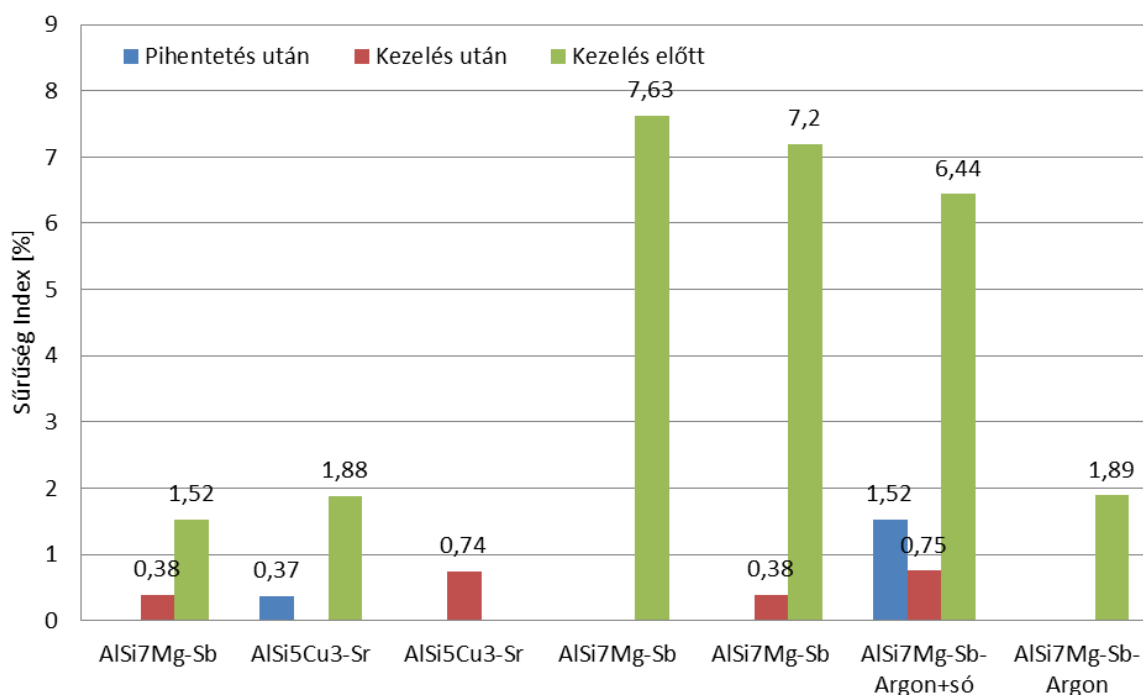
51. ábra. Átfolyási sebesség argonos gáztalanítás hatására

Megállapítható, hogy argonos gáztalanítás és tisztító só adagolás után az átfolyási sebesség közel azonos, mint gáztalanítás előtt, majd pihentetés hatására lecsökken az értéke. Ez lényeges eltérés a nitrogénes gáztalanítás esetén korábban tapasztalt nagymértékű átfolyási sebesség csökkenéshez képest. Ha az argonos gáztalanítás esetén tisztító só használat nélkül nézzük az átlagos átfolyási sebességet, azt tapasztaljuk, hogy az a

kiinduló értékekhez képest nagymértékben megnő, azaz ha az átfolyási sebesség nagyobb, akkor tisztább az olvadékunk, kisebb a zárványtartalma.

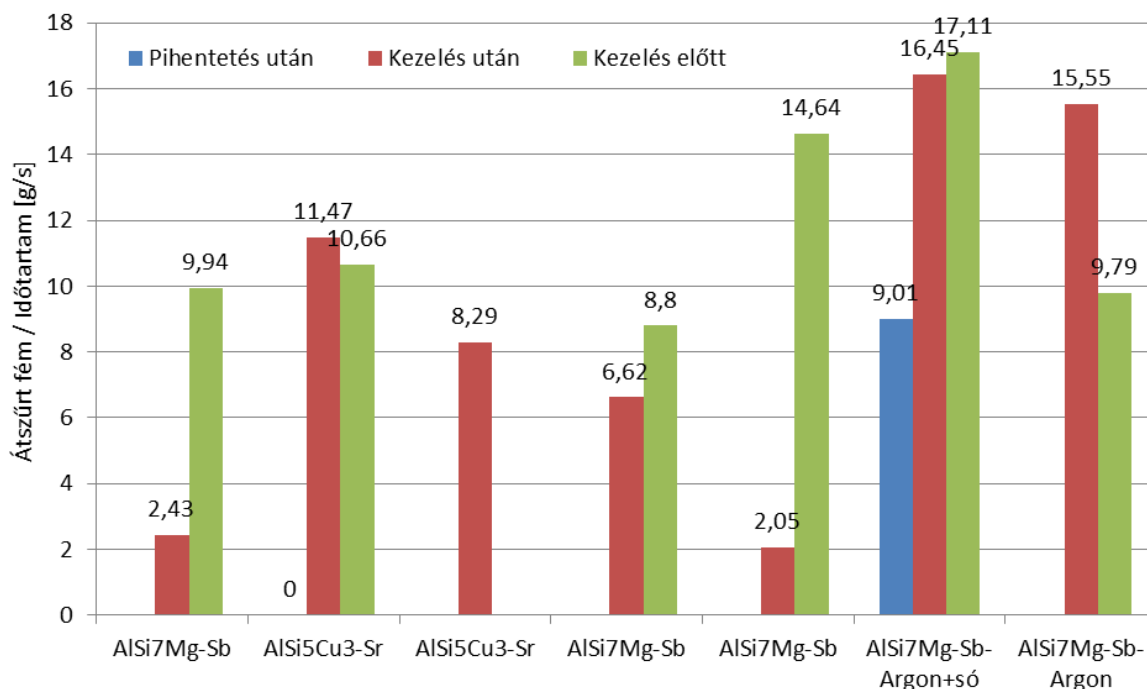
3.4.5. A sűrűségindex és a Prefil-készülékkel mért átfolyási tulajdonságok közötti összefüggések vizsgálata AlSi7Mg és AlSi5Cu3 ötvözetek esetén

A Prefil-készülékkel felvett átfolyási vizsgálatokkal együtt sűrűségindex méréseket is végeztem a különböző ötvözetek és eltérő módosító anyag alkalmazása esetén. A sűrűségindex eredményeket az 52. ábrán mutatom be.



52. ábra. Különböző ötvözetekhez és eltérő módosító anyag alkalmazásához tartozó sűrűségindex eredmények

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a gáztalanító kezelés után a sűrűségindex értékek az olvasztókemencében kialakuló kezdeti értéktől és a különböző módosítóanyag-tartalomtól függetlenül megfelelően alacsonyak. Korábbi vizsgálataim bizonyították, hogy a kokillaöntődében felhasznált olvadék akkor tekinthető megfelelő minőségűnek, akkor nem keletkezik gázos selejt, ha a sűrűségindex értékek 4 % alatt vannak. Ez a kritérium a kísérletsorozat során minden esetben teljesült. Az 53. ábrán a Prefil-készülékkel mért átlagos átfolyási sebesség és az olvadékezelés összefüggését mutatom be.



53. ábra. Különböző ötvözetekhez és eltérő módosító anyag alkalmazásához tartozó Prefil-eredmények

A Prefil-készülékkel mért átlagos átfolyási sebesség nagyobb értékei mutatják a nagyobb olvadéktisztaságot. A vizsgálati eredmények igazolják, hogy eltérőek az antimonos AlSi7Mg(Sb) és az alacsony stronciumtartalmú AlSi5Cu3(Sr) ötvözet átfolyási jellemzői. Az antimonos AlSi7Mg(Sb) ötvözet esetén a nitrogénes gáztalanító kezelés után az átfolyási tulajdonságok jelentős mértékben romlanak. Ezt a jelenséget az alacsony stronciumtartalmú ötvözetnél nem tapasztaltuk.

A vizsgálatokat elvégeztük argonos gáztalanító kezeléssel is. Ebben az esetben az átfolyási sebesség a gáztalanítás után nem csökkent le, ahogy azt az antimonos ötvözet nitrogénes kezelésénél tapasztaltuk, hanem a gáztalanítás előttivel azonos, vagy jobb átfolyási jellemzőket kaptunk.

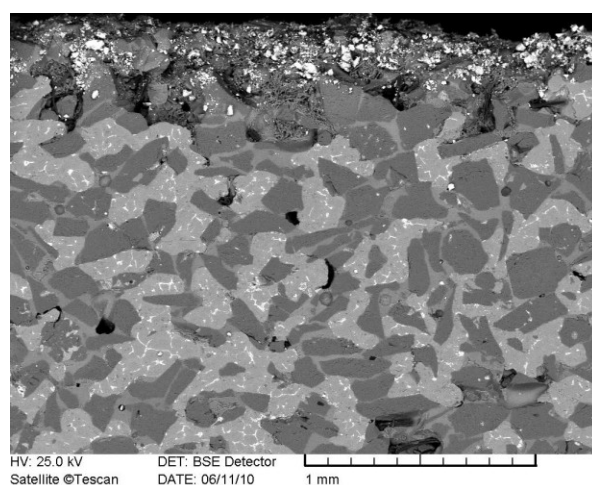
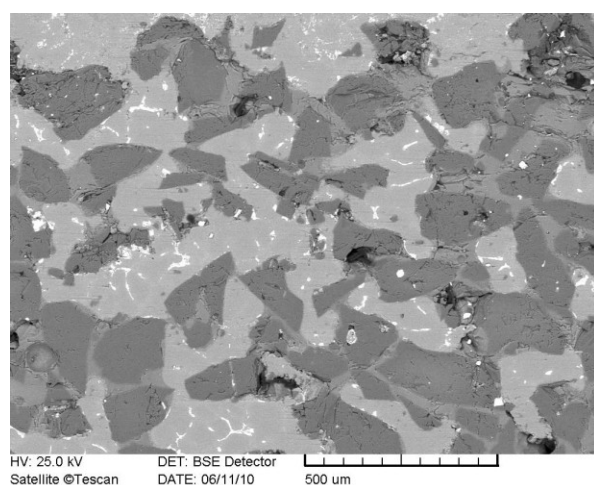
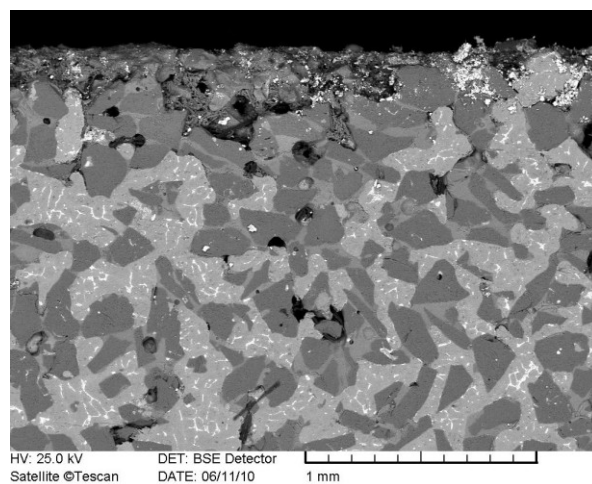
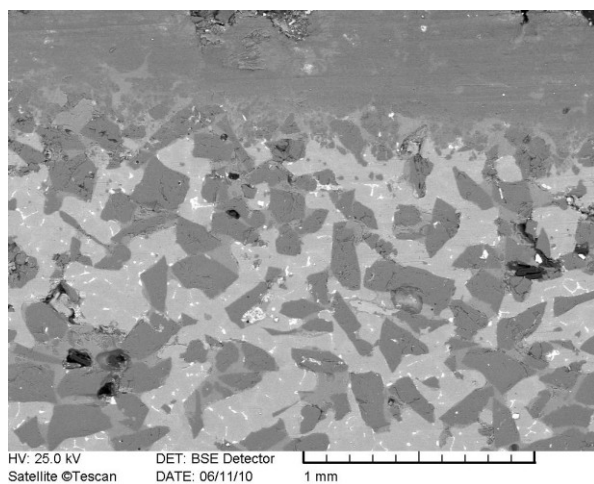
A hőntartó kemencékben mért átfolyási jellemzők vizsgálati eredményei szerint az antimonos és a stronciumos ötvözet között jelentős a különbség. Az antimonos ötvözet átfolyási sebessége gáztalanítás előtt ugyanolyan rossz, mint a gáztalanító kezelés után. Az AlSi5Cu3(Sr) ötvözet átfolyási jellemzői rosszabbak a kezelés utáni olvadékéhoz képest, de így is sokkal jobbak az antimonos ötvözetéhez viszonyítva.

3.4.6. Elektronmikroszkópos (REM) és mikroszondás (SEM) vizsgálati eredmények

Mivel a sűrűségindex és a Prefil-készülékkel nyert görbék alapján levont következtetés szerint az AlSi8Cu3 (200–250 ppm stroncium) és az AlSi7Mg (1200 ppm antimon) ötvözetek esetén a nitrogénnel történő rotoros gáztalanítást követően az átfolyási tulajdonságok negatív irányban változnak, szükség volt további vizsgálatokra. A Prefil-szűrő és a rajta fennmaradt AlSi -ötvözet metszetéről csiszolatot készítettünk, melyen elektronmikroszkópos vizsgálatot végeztünk.

3.4.6.1. AlSi5Cu3(Sr) ötvözet esetén készült elektronmikroszkópos felvételek és mikroszondás eredmények

Az 54. ábra az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba elektronmikroszkópos felvételeit tartalmazza.



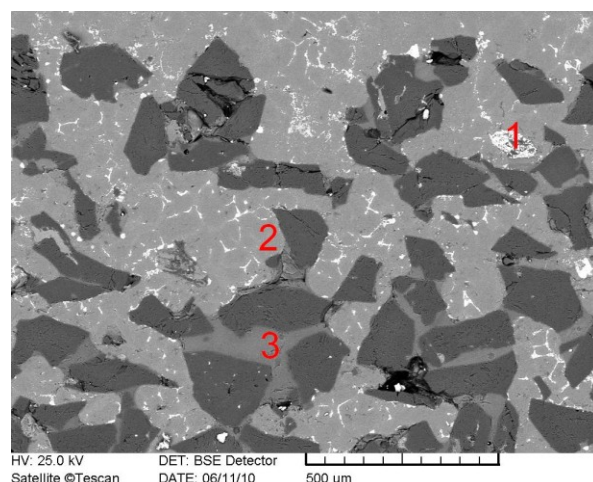
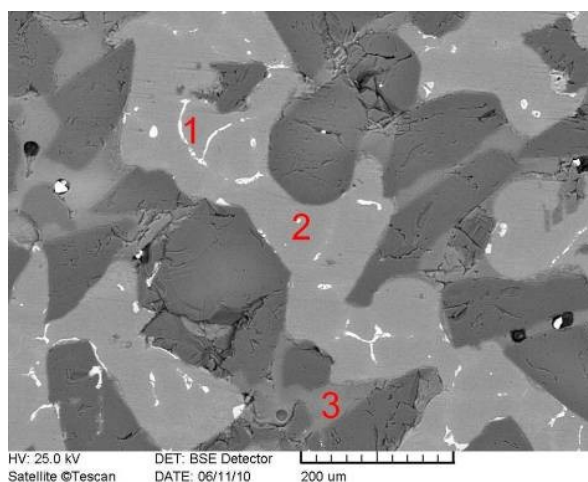
gáztalanítás előtt

gáztalanítás után

54. ábra. AlSi5Cu3 (80 ppm stroncium) ötvözetből az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba elektronmikroszkópos felvételei

Az 54. ábra felvételein gáztalanítás után a szűrő határfelületi rétegeiben kis méretű zárványokat találtam.

Az 55. ábrán az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba mikroszondás eredményeit mutatom be.



%	4-31	4-32	4-33
O			34,01
Na			2,39
Mg	1,77	1,53	2,03
Al	65,71	94,7	14,51
Si	1,31	1,45	36,67
K			4,23
Ca			3,12
Ti			1,39
Fe	0,84	0,22	1,1
Cu	30,36	2,11	0,55

%	6-31	6-32	6-33
O	20,15		34,59
Na	2,54		0,34
Mg	0,36	1,31	1,98
Al	8,21	81,92	14,72
Si	10,26	14,74	37,75
K	1,99		4,51
Ca	0,82		2,84
Ti	1,41		1,91
Mn	3,71		
Fe	49,58	0,36	1,16
Cu	0,96	1,67	0,2

AlSi5Cu3 (80 ppm Sr) gáztalanítás előtt

AlSi5Cu3 (80 ppm Sr) gáztalanítás után

55. ábra. AlSi5Cu3 ötvözetből az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba mikroszondás eredményei

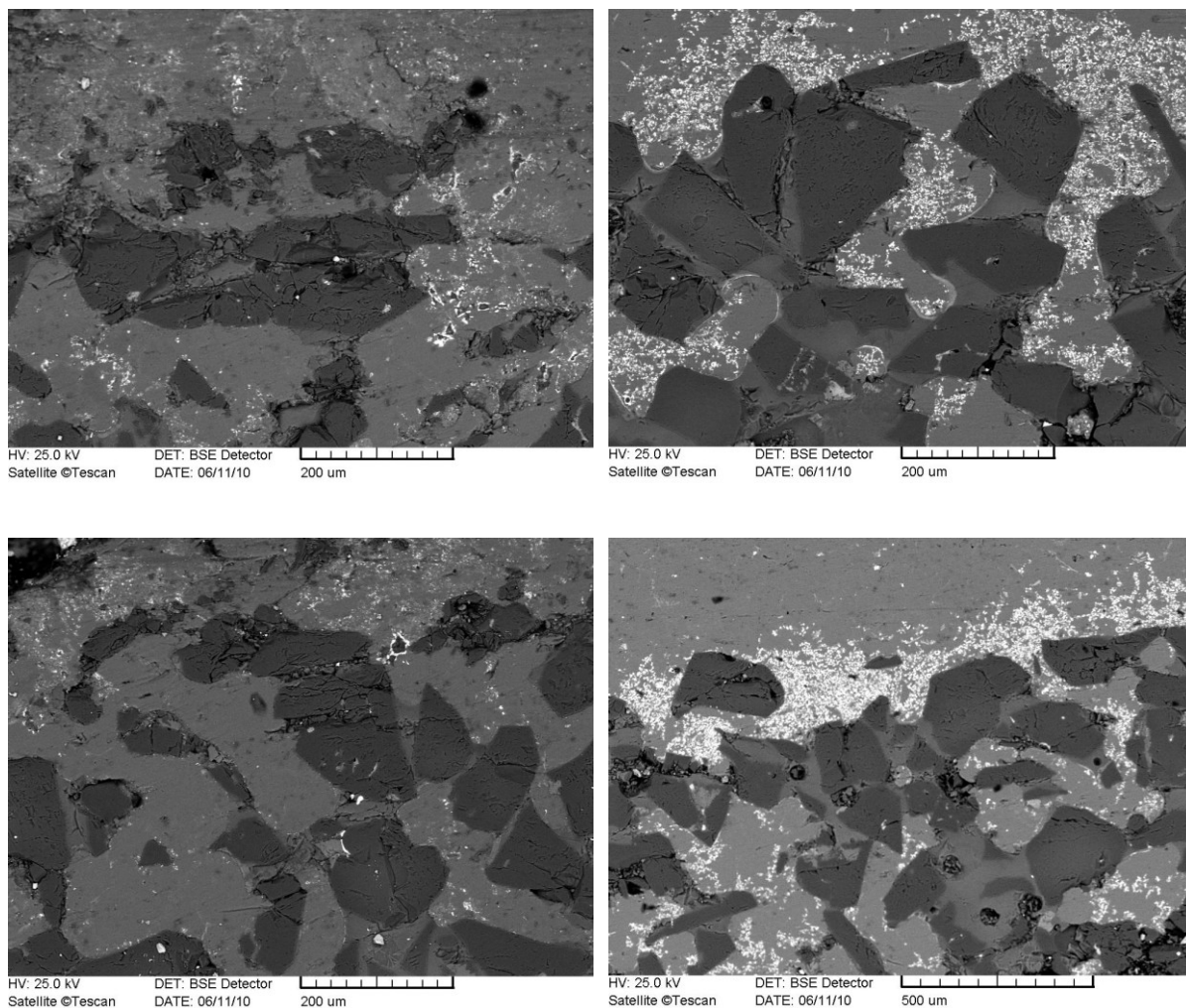
Az AlSi5Cu3 ötvözetből az olvasztóműben Prefil-készülékkel nyert próbák mikroszondás eredményei alapján megállapítható, hogy a csiszolatokon nem található olyan eltérő fázis, mely a gáztalanítással kapcsolatban lenne és megváltoztatná az olvadék átfolyási tulajdonságait. A spektrométeres elemzés eredményei azt mutatják, hogy az olvadék a gáztalanításnál még alacsony stronciumtartalmú, ezáltal a kezelőanyag sem befolyásolja az átfolyási jellemzőket.

A szűrő üregeiben az AlSi5Cu3 ötvözet vizsgálatánál is nagy szilícium- és oxigéntartalmú, üveges szerkezetű kiválás található (4-33 és 6-33 jelzésű helyek és elemzési eredmények), de ez nem hozható kapcsolatba az olvadék felületén képződő oxidhártyával.

Az AlSi5Cu3 ötvözet esetén Prefil-készülékkel végzett vizsgálat során az átfolyási jellemzők nem változnak a gáztalanító kezelés hatására. Ez az ötvözet vegyületképződésre hajlamos ötvözőinek alacsony koncentrációjával hozható kapcsolatba.

3.4.6.2. AlSi7Mg ötvözet esetén készült elektronmikroszkópos felvételek és mikroszondás eredmények

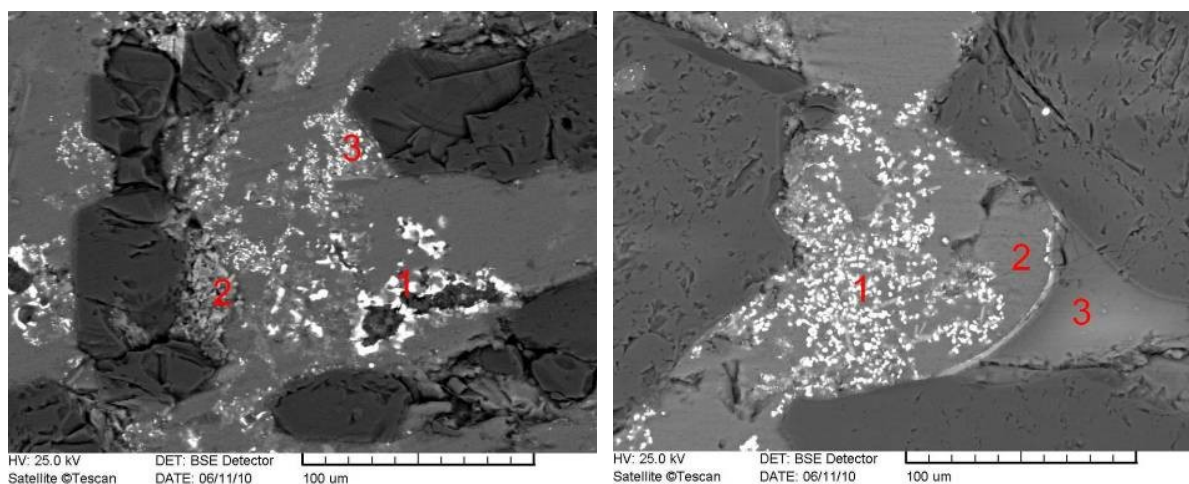
Az 56. ábrán az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba elektronmikroszkópos felvételeit mutatom be.



AlSi7Mg (1200 ppm Sb) gáztalanítás előtt AlSi7Mg (1200 ppm Sb) gáztalanítás után
56. ábra. AlSi7Mg ötvözetből az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba elektronmikroszkópos felvételei

Az 56. ábrán jól látható, hogy gáztalanítás után sok apró, kis méretű zárvány található a szűrő határfelületi rétegeiben és a belsejében, a pórusaiban is.

Az 57. ábrán az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba mikroszondás eredményeit mutatom be.



%	1-31	1-32	1-33
O	11,45	32,76	4,93
Mg	11,36	0,00	4,06
Al	30,05	6,29	69,68
Si			1,68
K		1,42	
Sb	47,15		13,34
Ti		58,20	6,30
Fe		1,32	

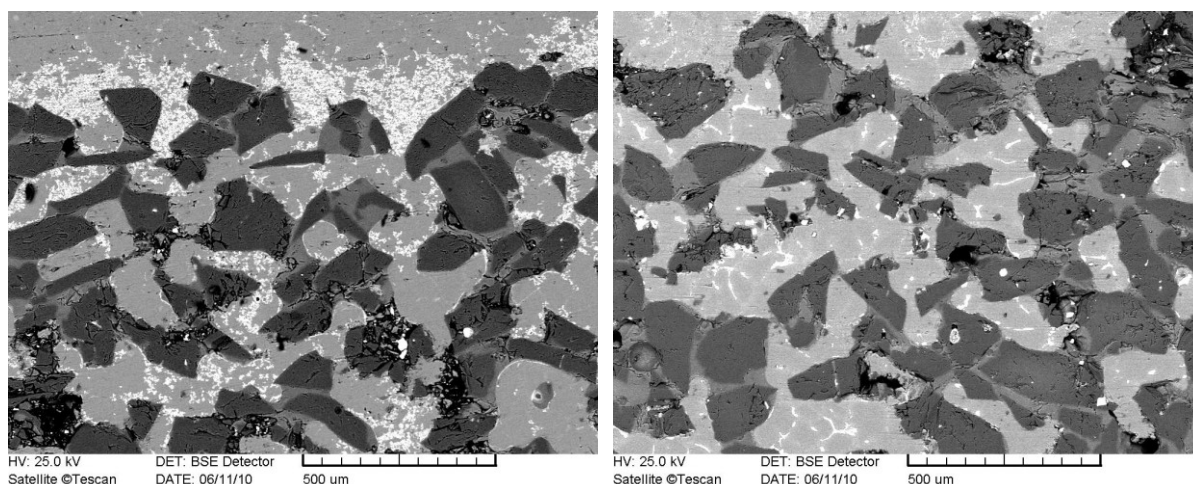
%	3-41	3-42	3-43
O	2,4	2,15	37
Na			2,37
Mg	2,95	1,59	2,35
Al	69,84	93,41	15,59
Si	6,35	1,62	35,53
K			2,59
Ca			3,09
Sb	15,78	0,62	
Ti	2,67	0,62	1,48

AlSi7Mg (1200 ppm Sb) gáztalanítás előtt AlSi7Mg (1200 ppm Sb) gáztalanítás után
 57. ábra. AlSi7Mg ötvözetből az olvasztóműben gáztalanítás előtt és után Prefil-készülékkel nyert próba mikroszondás eredményei

Az AlSi7Mg ötvözetből az olvasztóműben Prefil-készülékkel nyert próbák mikroszondás eredményei alapján megállapítható, hogy a gáztalanítás után a szűrő fölött és az üregeiben sok apró, antimon tartalmazó zárvány gyűlik össze, mely nagymértékben csökkenti az olvadék átfolyásának tömegáramát.

A szűrő üregeiben nagy antimontartalmú fázis található (1-31, 1-33 és 3-41 jelzésű helyek és elemzési eredmények). A gáztalanítás közben megnő a sok apró zárvány mennyisége az olvadékban, mely a szűrő fölött gyűlik össze és megváltoztatja a Prefil-készülékkel nyert próbák átfolyási viszonyait. Ettől függetlenül az olvadék a hőntartás és pihentetés után megfelelő minőségű.

Az 58. ábra tartalmazza az AlSi7Mg (1200 ppm antimon) ötvözetből Prefil-készülékkel nyert próbák elektronmikroszkópos felvételeit nitrogénes, illetve argonos gáztalanítást követően.



nitrogénes gáztalanítást követően

argonos gáztalanítást követően

58. ábra - Prefil-készülékkel nyert próba elektronmikroszkópos felvétele AlSi7Mg (1200 ppm stroncium) ötvözet esetén nitrogénes és argonos gáztalanítást követően

Az 58. ábrán jól látható, hogy a nitrogénes gáztalanítást követően vett minta szűrőpórusai között, de főleg a tetején, sok kis apró zárvány található, míg az argonos gáztalanítást követően vett próba elektronmikroszkópos felvételén ilyen kiválást nem találtam.

A szakirodalomban [68] [73] találtam hasonló kísérleteket, amikor olyan A356 ötvözetet vizsgáltak, melynek stronciumtartalma 200–600 ppm között volt. A kísérletek során kapott eredmények azt mutatták, hogy az átlagos olvadáskínőség a gáztalanító kezelést követően rosszabb, a zárványok mennyisége egyértelműen nő. A szerzők feltételezik, hogy az „oxidbőrök” és a finom zárványok száma egyaránt növekedett, melyet egyrészt azzal magyaráznak, hogy az olvadék oxidációs hajlama nő a stroncium-adagolással, a stroncium felületi feszültségre gyakorolt hatása következtében növeli az öntvényrészek gázporozitását. Másrészt az a vélemény, hogy a görbe meredekségének jelentős változása azt mutatja, hogy az olvadék részecskéket tartalmaz, mégpedig szemcsefinomító adalékot, és a görbe meredekségének, az olvadék átfolyási jellemzőinek megváltozása a börtartalommal függ össze [68].

Másik esetben A356 és A391 ötvözet esetén végeztek Prefil-készülékkel méréseket. A356 ötvözet esetén a Prefil-készülékkel felvett diagram görbéinek ellaposodását a szemcsefinomító adagolásnak tulajdonítják. A TiB_2 réteg akadályozza a mérést, és ezáltal egy látszólag magas szennyezőanyag-tartalom mutatható ki. Azt a következtetést vonták le, hogy

a szemcsefinomított olvadékok nemfémes szennyezettségének mérésére a Prefil-módszer nem alkalmas [73]. Ezen kísérletsorozatot kibővítették stronciummal módosított olvadék vizsgálatára is, és megállapították, hogy az AlSr10 mesterötvözet rudak gyakorlatban szokásos felhasználása nem befolyásolja a Prefil-készülékkel nyert eredményt [73].

3.4.7. A vizsgálati eredmények termodinamikai magyarázata

A Prefil-készülékkel nyert próbák mikroszondás vizsgálata során azt az eredményt kaptuk, hogy az AlSi7Mg(Sb) ötvözet esetén gáztalanítás után a szűrő fölött és az üregeiben sok apró, antimon tartalmazó zárvány gyűlik össze, mely nagymértékben csökkenti az olvadék átfolyásának tömegáramát. AlSi5Cu3(Sr) ötvözet esetén a csiszolatokon nem található olyan eltérő fázis, mely a gáztalanítással kapcsolatban lenne, és megváltoztatná az olvadék átfolyási tulajdonságait.

3.4.7.1. Az stroncium és a nitrogén együttes előfordulása a zárványokban

A 18. táblázat a binér kölcsönhatásokat mutatja be a binér fázisdiagramok alapján.

18. táblázat. A binér kölcsönhatások [74]

	Al	Si	Mg	N	Sr	Sb	Ti
Al	X						
Si	eutekt.	X					
Mg	Al ₃ Mg ₂	Mg ₂ Si	X				
N	AlN	Si ₃ N ₄	Mg ₃ N ₂	X			
Sr	Al ₄ Sr	Si ₂ Sr	Mg ₂ Sr	Sr ₃ N ₂	X	X	
Sb	AlSb	eutekt.	Mg ₃ Sb ₂	nincs inf.	X	X	
Ti	Al ₃ Ti	TiSi	monotekt.	TiN	monotekt.	TiSb	X

Az antimon és a nitrogén egymással binér vegyületet valószínűleg nem képeznek (a Sb-N fázisdiagram nem ismert). Az alumíniumolvadékban a nitrogén nem oldódik, de az AlN stabil szilárd vegyület, ezért az N₂-buborék/Al határfelületen AlN hártya keletkezik.

Ezzel szemben az alumínium-antimon rendszerben ugyan keletkezik AlSb vegyület, de ahhoz, hogy az alumíniumolvadékból 720 °C-on ez magától kiváljon, 2% feletti antimontartalomra lenne szükség, azonban a vizsgált ötvözetekben ennél kevesebb van jelen (1200 ppm, azaz 0,12%).

A nitrogén és antimon közötti hasonlóság lehet az alapja annak, hogy az alumínium, magnézium és titán komponensek ternér vegyületeket képezzenek velük, melyekben az antimon és a nitrogén egy anionos alrácsot alkotnak, és abban felcserélhetik egymást.

Ezekben az ionos vegyületekben a nitrogén és az antimon -3 vegyértékű, az alumínium és a titán $+3$ vegyértékű (emiatt AlN és TiN , illetve AlSb és TiSb keletkezik), míg a magnézium $+2$ vegyértékű (emiatt Mg_3N_2 és Mg_3Sb_2 keletkezik). Mindegyik vegyületben van külön kation alrács és anion alrács. Elvileg a kation alrácsban az alumínium és a titán (vagy helyettük a magnézium), míg az anion alrácsban a nitrogén és az antimon alkothatnak szilárd oldatot [74].

A fentiek alapján valószínű, hogy első lépésben a nitrogénbuborék/alumínium határfelületen vékony AlN hártya alakul ki. Ennek a vastagodását gátolja a N^{-3} ionoknak az AlN hártján keresztüli lassú diffúziója. Azonban az alumínium oldaláról érkezik "segítség": az antimon atomok, amelyek Sb^{-3} ionok formájában tovább növelhetik az AlN hártját belülről, AlSb formában. Az így kialakuló anion rácsban két, erősen különböző méretű anion lesz: a nagyméretű Sb^{-3} és a kisméretű N^{-3} . Ez oda fog vezetni, hogy az AlN -be épülő Sb^{-3} ionok meggyorsítják az N^{-3} ionok diffúzióját, így a hártya tovább vastagszik. Azonban a továbblépéshez újabb és újabb Sb^{-3} ionoknak kell beépülniük, így végül kialakul az $\text{Al}(\text{Sb},\text{N})$ fázis, ami sokkal vastagabb lesz, mint amilyen az AlN lehetne az antimon távollétében. A másik oldalról azonban nitrogén nélkül semmi nem történne, mert az AlSb kiválásához nincs elég antimon a rendszerben. Tehát a nitrogén és az antimon egymásra vannak utalva az $\text{Al}(\text{N},\text{Sb})$ vegyület kialakításában. Az antimonnak a nitrogénre termodinamikai szempontból van szüksége, míg a nitrogénnek az antimonra kinetikai szempontból. Tehát az antimon és a nitrogén szimbiózisban hozzák létre az $\text{Al}(\text{Sb},\text{N})$ vegyületet. A magyarázat kiegészíthető azzal, hogy az $\text{Al}(\text{Sb},\text{N})$ rács helyett $(\text{Al},\text{Ti})(\text{Sb},\text{N})$ rács alakul ki, hiszen az Al^{+3} és a Ti^{+3} megférnek egy kationrácsban (amit igazol a kevert Al-Ti oxidok léte is).

Hasonló mechanizmus képzelhető el az alumíniumban oldott magnéziummal, ami felületaktív is, és ezért a nitrogénbuborékok belső felületét Mg_3N_2 vegyület is boríthatja. Ha ez így van, az azzal rokon Mg_3Sb_2 vegyület ránóthat annak alumínium felöli oldalára és kialakulhat egy $\text{Mg}_3(\text{Sb}, \text{N})_2$ vegyület is.

Sajnos az $\text{Al}(\text{Sb},\text{N})$ fázis létezéséről bizonyíték nincs, ehhez ismerni kellene a ternár Al-Sb-N fázisdiagramot, ami nem létezik [74].

3.4.7.2. A stroncium és a nitrogén együttes előfordulása a zárványokban

Az antimon és a nitrogén azért "járnak együtt", mert hasonlóak, azaz mindkettő -3 vegyértékű anion. A stroncium azonban $+2$ vegyértékű kation, így nem hasonlít a nitrogénre.

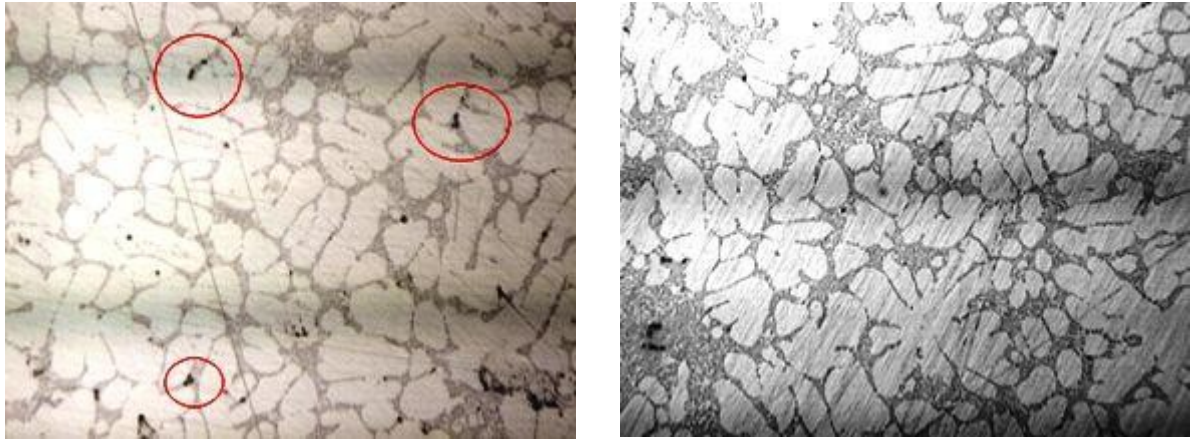
Az Sr_3N_2 vegyület ugyan létezik, de két nagyságrenddel kevesebb stroncium van a rendszerben ahhoz, hogy ez magától kialakulhasson.

A fentiek analógiájára nézzük meg, mi a stroncium esélye a zárványképzésre? A stroncium +2 vegyértékű alkáliföldfém, a magnézium rokona. Tételezzük fel, hogy a nitrogénbuborékok felületén Mg_3N_2 vegyületek kialakulhatnak (mivel a magnéziumtartalom egy-két nagyságrenddel nagyobb, mint a stronciumtartalom). Ha ez igaz, akkor az Mg_3N_2 rácsban az Mg^{+2} ionok mellé beépülhetnek a Sr^{+2} ionok.

Esetünkben az alacsony stronciumtartalmú ötvözetekben az Mg_3N_2 hártya azért nem tud növekedni, mert rajta keresztül mind az Mg^{+2} , mind az N^{3-} ionok diffúziója nagyon lassú. Azonban ha magasabb stronciumtartalom mellett az Mg_3N_2 vegyület kationrácsába beépül az Sr^{+2} , ez a kationrács tágulásához vezet, hiszen az Sr^{+2} ion lényegesen nagyobb, mint az Mg^{+2} ion. Ezzel jelentősen megnő az Mg^{+2} ionok diffúziós sebessége az $(\text{Mg},\text{Sr})_3\text{N}_2$ hártyán át, és ez a fázis gyorsan nő. Tehát a stroncium és a magnézium szimbiózisban élnek: a stronciumnak a magnéziumra termodinamikai okokból van szüksége, míg a magnéziumnak a stronciumra kinetikai okokból van szüksége ahhoz, hogy nagyméretű $(\text{Mg},\text{Sr})_3\text{N}_2$ fázis alakuljon ki. Sajnos az $(\text{Mg},\text{Sr})_3\text{N}_2$ fázis létezéséről sincs bizonyíték, ehhez ismerni kellene a ternér Mg-Sr-N fázisdiagramot, ami nem létezik.

A fenti két, hasonló elmélettel magyarázható az is, hogy miért nincs zárvány argongáz esetén, és azt is, hogy miért kell a zárványhoz elegendően nagy stroncium vagy antimon koncentráció [74].

A szakirodalomban [83] találtam olyan üzemi vizsgálati eredményeket is, ahol Mg_3Sb_2 rideg kristályt találtak a szövetképen 1000 ppm antimontartalmú ötvözet esetén. 901°C alatt az Mg_3Sb_2 rideg kristály alfa változata, míg ezen hőmérséklet felett az átalakulás után a béta rács figyelhető meg. Az alumínium öntészeti technológiáit ismerve a vegyület visszaolvadására nincs esély. Az 59. ábrán a vizsgált, 1000 ppm antimontartalmú ötvözet szövetképeit mutatom be, melyen láthatók az Mg_3Sb_2 intermetallikus vegyületfázisok.



59. ábra. Mg_3Sb_2 intermetallikus fázisok a vizsgált szövetképeken

Az üzemi vizsgálati eredmények és tapasztalatok azt mutatják, hogy az olvadékba történő túlzott módosítóanyag adagolás – jelen esetben antimon – a későbbiekben csökkenti az öntvény felhasználhatóságát, hibát okoz, mivel a fárasztó-igénybevételnél rontja a kifáradási tulajdonságokat [83].

4. Összefoglalás

A kapott eredmények feldolgozása és a csiszolatok elkészítése után megállapítható, hogy az üzemi körülmények változtatásával sikerült a jó és a hibás öntvényekhez hozzárendelni az előírható sűrűségindex mért értékeit. Ezáltal a gyártás során a sűrűségindex és a hidrogéntartalom folyamatos figyelemmel kísérésével elkerülhető a hibás öntvények gyártása.

Szintén megállapítható, hogy ennyi mérés alapján pontos és szoros összefüggést nem lehet felállítani a sűrűségindex és a hidrogénszondával történő vizsgálati módszer eredményei között. Ezt állapították meg más kutatási eredmények is [73], tehát alacsony hidrogénkoncentrációnál és 5% sűrűségindex alatt az eredmények korrelációja nem bizonyítható.

Ezen kívül sikerült optimálisabbá tenni az olvadékezelést, mivel az elvégzett kísérletek és a mért adatok alapján a rotoros gáztalanító gáztalanítási idejét 12 percről 7 percre lehet csökkenteni, mivel ennyi idő alatt is megfelelő a gáztalanítás mértéke. Ezzel jelentős energiamegtakarítás és költségcsökkenés érhető el.

A vizsgálati eredmények alátámasztják azt a megállapításunkat, miszerint a sűrűségindex mérési eredmények a nagyobb változási arány miatt a minőségeltérést érzékenyebben mutatják ki, mint az oldott hidrogén mérési eredmények.

A sűrűségindex változásában nincs jelentős különbség a vizsgált rotorok között. A sűrűségindex változása a kezdeti értékhez viszonyítva 85–90%.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a sűrűségindex vizsgálat az üzemi minőségellenőrzés jól használható módszere.

Az oldott hidrogén mérési eredmények változásában jelentős különbség van a vizsgált olvadékok és rotorok között.

A gáztalanítás előtti oldott hidrogén mérési eredmények tág határok között változnak (0,10–0,32 ml/100g), egyes olvadékok gáztalanítás előtti értékei azonosak más olvadékok gáztalanítás utáni értékeivel.

A gáztalanítás utáni értékek között is jelentős a különbség (0,04–0,10 ml/100g), és az eredmények szórása kétszerese a sűrűségindex mérési eredmények szórásának.

Az oldott hidrogén változása a kezdeti értékhez viszonyítva 45–80%.

Az elvégzett vizsgálatok eredményei szerint az oldott hidrogén változása a kisebb fordulatszám és hosszabb gáztalanítási idő alkalmazása esetén kedvezőbb.

A vizsgálati eredmények alapján nem lehet kijelölni olyan oldott hidrogén határértéket, mely alapján eldönthető, hogy az megfelelően biztosítja a hibamentes öntvények gyártásának követelményeit.

A gáztalanítás hatásossága és a zárványosság között szoros kapcsolat nincs. A gáztalanítás közben megnő az apró zárványok mennyisége az olvadékban, mely a szűrő fölött gyűlik össze és megváltoztatja a Prefil-próbák átfolyási viszonyait.

A scanning elektronmikroszkóp nem megfelelő műszer a kisméretű (<250 μm hosszúságú és <1 μm vastagságú) oxidhártyák és zárványok kimutatására.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a gáztalanító kezelés utáni sűrűségindex értékek az olvasztókemencében kialakuló kezdeti értéktől függetlenül az elérhető értéknek megfelelően alacsonyak.

Megállapítható, hogy a sűrűségindex és a Prefil mérések alapján meghatározható átlagos átfolyási sebesség között nincs kapcsolat.

Az AlSi7Mg antimonos ötvözetből az olvasztóműben vett Prefil-próbák mikroszondás eredményei alapján megállapítható, hogy a gáztalanítás után a szűrő fölött és az üregeiben sok apró, antimont tartalmazó zárvány gyűlik össze, mely nagymértékben csökkenti az olvadék átfolyásának tömegáramát.

Az AlSi5Cu3 stronciumos ötvözetből az olvasztóműben vett Prefil-próbák mikroszondás eredményei alapján megállapítható, hogy a csiszolatokon nem található olyan eltérő fázis, mely a gáztalanítással kapcsolatban lenne, és megváltoztatná az olvadék átfolyási tulajdonságait.

A gáztalanítás közben megnő az apró zárványok mennyisége az olvadékban, mely a szűrő fölött gyűlik össze és megváltoztatja a Prefil-próbák átfolyási viszonyait. A Prefil-készülékkel mért átlagos átfolyási sebesség nagyobb értékei mutatják a nagyobb olvadéktisztaságot. Ebben a vonatkozásban az AlSi5Cu3 stronciumos ötvözet a kedvezőbb.

A vizsgálatokat elvégeztük AlSi7Mg antimonos ötvözzel argonos gáztalanító kezeléssel is. Ebben az esetben a gáztalanítás után az átfolyási sebesség nem csökkent le,

ahogy az antimonos ötvözet nitrogénes kezelésénél tapasztaltuk, hanem azonos, vagy jobb átfolyási jellemzőket kaptunk.

5. Summary

In the area of safety parts of automotive industry most companies and foundries use high technology manufacturing. According to the requirements the castings must be free of internal continuity defects, gas porosity, contraction cavity, shrinkage cavity and inclusions. At the same time they must also have good mechanical properties. Experience shows that the main defect is usually gas porosity. This is generated by the segregation of dissolved hydrogen gas in the melt which can be prevented by degassing treatment. To achieve good mechanical properties continuous technological development and high level of production discipline is required.

The main goal of the first part of my Ph.D. research work was to find a connection between the results of Alspek H hydrogen sensor and the measurement results of the density index. I also studied the advantages and disadvantages of these devices, and how justified their use is in practice, and how they effect manufacture safety and the rate of scrap.

The goal of the second part of my Ph.D. research work was to optimize the melt treatment of automotive industry AlSi-castings. I investigated 3 different degassing rotors with different operational parameters.

Castings poured from AlSi-melts into gravity die don't have homogeneous structure. Their mechanical properties depend on the size and distribution of the grains evolved during the crystallization process, and also on the strength reducing effects of gas and non-metallic inclusions.

The goal of the third part of my my Ph.D. research work was to investigate the inclusion content of AlSi melts focusing on the examination methods and the foundry technology effects. Experience shows that the inclusion content relates with degassing and grain refining treatments. I studied the effect of melt treatments during my examinations and analysed the reduction possibilities of inclusions. I tried to establish a connection between the degassing treatment and the inclusion content of the melt. I also compared the Prefil measurement results for different alloys and with different modifiers (Sr, Sb). In each case the experiments were made in gravity die foundries that produce automotive castings. The investigated alloys were AlSi8Cu3 (200-250 ppm Sr), AlSi7Mg (1200 ppm Sb) and AlSi5Cu3 (80 ppm Sr).

I have determined that the main advantage of the Alspek H device is that it can continuously measure the changes of dissolved hydrogen contents. Using this device it's possible to establish a technological procedure which ensures scrap free casting manufacturing.

The flow properties of AlSi8Cu3 (200-250 ppm Sr), AlSi7Mg (1200 ppm Sb) and AlSi5Cu3 (80 ppm Sr) alloys are different. After the degassing treatment the flow properties of AlSi8Cu3 (200-250 ppm Sr) and AlSi7Mg (1200 ppm Sb) alloys are significantly worse. Surprisingly this is the opposite of what I expected and what can be found in the literature. The degassing treatment should have improved the melt quality. This phenomenon in case of AlSi5Cu3 alloy with 80 ppm Sr-content was not observed.

I investigated the Prefil filter for all alloys using REM and SEM. I found that during the degassing treatment the number of small inclusions in the melt are increasing. The small inclusions accumulate above the filter and clog the pores of it. This phenomenon greatly reduces the flow rate of the melt.

The tests were also carried out with argon degassing treatment for AlSi7Mg (1200 ppm Sb) alloy. In this case the flow rate has not decreased after the degassing treatment. This is the opposite that was experienced for AlSi7Mg (1200 ppm Sb) and AlSi8Cu3 (200-250 ppm Sr) alloys after nitrogen treatment. During argon degassing the number of small inclusions didn't increase. The melt had similar or better flow properties compared to nitrogen degassing.

I found that under foundry conditions intermetallic compounds precipitate during nitrogen degassing treatment for Al-Si-Mg melts with high Sr- or Sb- content. These compounds did not precipitate during argon degassing treatment or if the Sr- or the Sb- content was low.

6. Új tudományos eredmények

1. Megvizsgáltam a járműipari öntészeti alumínium-szilícium olvadékok oldott hidrogéngáz kimutatására alkalmas direkt és indirekt módszerekkel kapott eredmények közötti összefüggéseket.

1.1. A sűrűségindex indirekt mérési módszer a nagyobb változási arány miatt sokkal nagyobb pontossággal mutatja az olvadék oldott gáztartalmának változását, mint a hidrogénszondás direkt mérési módszer.

1.2. A sűrűségindex mérési módszer eredményeihez lehet megfelelő olvadékminőséget biztosító határértékeket előírni az üzemi technológia számára, a hidrogénszondával történő mérési módszerhez ilyen határértéket nem lehet megállapítani. Az általam vizsgált járműipari öntészeti alumínium-szilícium olvadékok nitrogénes rotoros gáztalanító kezelése mellett a sűrűségindex határértéke 2%, azaz az olvadékok minősége 2% alatti sűrűségindex érték esetén megfelelő a gravitációs öntéssel történő öntvénygyártásra, a hidrogénbuborékok kiválása okozta öntvényselejt megakadályozására.

1.3. Az általam elvégzett kísérletek alapján a hidrogénszonda az oldott hidrogéntartalom beavatkozás és folyamat közbeni változásának kimutatására alkalmas, segíti a gáztalanítási paraméterek, főleg az időtartam beállítását, de a gáztalanított olvadék végső hidrogéntartalmának kimutatásánál nagy mérési ingadozás, szórás tapasztalható.

1.4. A járműipari öntészeti alumínium-szilícium olvadékok estén a sűrűségindex értékek és a hidrogénszenzorral mért oldott hidrogéntartalom között nem állapítható meg szoros összefüggés, különösen érvényes ez a gáztalanítás előtti olvadékokra. A gáztalanítás utáni olvadékok lecsökkent sűrűségindex értéke és az oldott hidrogéntartalom szűk tartományában szoros összefüggés, egyenes arányosság állapítható meg.

2. Megvizsgáltam az üzemi technológia szerint alkalmazott különböző geometriájú rotorok gáztalanítási hatékonyságát. A kísérletek során különböző gyártású és geometriájú rotorok összehasonlítását végeztem el, az olvadék hidrogéntartalmát pedig mind indirekt sűrűségindex módszerrel, mind direkt hidrogénszondával mértem. A rotoros gáztalanításhoz alkalmazott rotorok geometriai fejlesztése a minél rövidebb gáztalanítási idő elérése érdekében történik.

2.1 A vizsgálatba bevont különböző geometriai kialakítású rotorok a sűrűségindex értékek és az oldott hidrogéntartalom mérési eredmények alapján, az alkalmazott paraméterek mellett, lényeges gáztalanítási hatékonyság eltérést nem mutatnak.

2.2 A vizsgált járműipari öntészeti ötvözet (AlSi9Cu3Mg) és technológiai körülmények alapján a legjobb eredményt az oldott hidrogéntartalom és a sűrűségindex mérési eredmények változásának a kezdeti értékekhez viszonyított aránya alapján a nagyobb fordulatszám (520 fordulat/perc) és hosszabb gáztalanítási idő (15 perc) működtetési paraméterek alkalmazása esetén kaptuk.

3. Megvizsgáltam Prefil-módszerrel a rotoros gáztalanító kezelés zárványtartalomra gyakorolt hatását különböző ötvözetek, különböző gáztalanító kezelésre használt gázok (nitrogén és argon) és különböző módosítóanyag-tartalom mellett.

3.1 Megállapítottam, hogy a Prefil mérési módszer alkalmazásánál az átfolyt olvadék mennyisége a gáztalanító kezelést követően kevesebb, illetve a szűrőn történő átfolyási tulajdonságok rosszabbak, mint gáztalanító kezelés előtt, valamint a gáztalanító kezelés és hőntartás után. Ezek alapján a rotoros gáztalanító kezelés hatékonyan lecsökkenti az olvadék oldott hidrogéntartalmát, de nem eredményezi az olvadék zárványtartalmának csökkenését.

3.2 Nitrogénes gáztalanító kezelés során a feleslegben adagolt módosítóanyag (antimon, stroncium) egy része finomszemcsés vegyületfázist alkot és a Prefil-szűrő pórusait eltömíti, ez okozza az olvadék átfolyási jellemzőinek megváltozását.

3.3 Argonnal végzett gáztalanító kezelés során nem romlanak a Prefil-szűrés átfolyási jellemzői, és nem képződik finomszemcsés, nagy módosítóanyag-tartalmú vegyületfázis.

3.4 A gáztalanító kezelés optimalizálására irányuló, általam elvégzett vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy a sűrűségindex és a Prefil mérések alapján meghatározható átlagos átfolyási sebesség között nincs kapcsolat.

3.5 A finomszemcsés, sok antimont tartalmazó vegyületfázis feltehetően $\text{Al}(\text{N}_x\text{Sb}_{1-x})$ tartalmú vegyület, ahol a Sb-3 és az N-3 ionok felcserélhetik egymást az anion rácsban. Ennek a vegyületnek a határesetei az AlN és az AlSb vegyületek (Sb és N hiányában). Ez olyan hipotézis, mely nem mond ellent a kémiai termodinamikának és összhangban van a

kísérleti megfigyelésekkel: átfolyási sebesség megváltozása, Prefil-szűrő REM és SEM vizsgálati eredmények.

3.6 A finomszemcsés, sok stronciumot tartalmazó vegyületfázis feltehetően $(\text{Mg}_x\text{Sr}_{1-x})_3\text{N}_2$ tartalmú vegyület, amiben az Mg^{+2} és Sr^{+2} kationok felcserélhetik egymást a kationos alrácsban. Ennek a vegyületnek a határesetei a Mg_3N_2 és a Sr_3N_2 vegyületek (Sr és Mg hiányában). Ez olyan hipotézis, mely nem mond ellent a kémiai termodinamikának és összhangban van a kísérleti megfigyelésekkel: átfolyási sebesség megváltozása, Prefil-szűrő REM és SEM vizsgálati eredmények.

7. Köszönetnyilvánítás

Ezúton fejezem ki köszönetemet tudományos vezetőmnek, *Dr. Dúl Jenőnek*, aki munkámat mindvégig támogatta és a dolgozat megírásához nélkülözhetetlen segítséget nyújtott.

Köszönettel tartozom a Metallurgiai és Öntészeti Tanszék munkatársainak a szakmai és emberi támogatásért.

Köszönöm szépen az ipar és a szakma támogatását, emellett külön köszönettel tartozom *Gyurán Lászlónak*, *Dr. Fegyverneki Györgynek* és *Mile Djurdjevicnek*.

Köszönöm a Nemark Győr Alumíniumöntöde Kft. és a Le Belier Hungary Zrt. öntöde munkatársainak, hogy lehetővé tették méréseim elvégzését.

Köszönöm családom, párom és barátaim türelmét és támogatását.

8. Irodalomjegyzék

- [1] *J. E. Hatch*: Aluminum: Properties and physical metallurgy, Aluminum Association, American Society for Metals, 2005
- [2] Miskolci Egyetem: Al – kokilla öntvények gyártásánál az olvadékkezelési technológia felülvizsgálata, az anyagfolytonossági hibák okainak vizsgálata, Kutatási Jelentés, (2004) Megrendelő: Le Belier Magyarország Formaöntőde Rt. Ajka; Témafelelős: *Dr. Dúl Jenő*
- [3] *Dr. Jónás P.*: Könnyűfém öntészeti ismeretek, Oktatási segédlet, Miskolc, 2011
- [4] *Dr. Verő József*: Fémten, Tankönyvkiadó, Budapest, 1969
- [5] *Dr. Varga Ferenc*: Öntészeti Kézikönyv Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
- [6] *S. T. McClain, J. T. Berry and B. Dawsey*: A Study of Porosity and Pore Morphology in Aluminum A356.2 Step Castings, 2003, AFS
- [7] *Lee, P. D. and S. Sridhari*: Direct Observation of the Effect of Strontium on Porosity Formation During the Solidification of Aluminum-Silicon Alloys, Intl. Jnl. Cast Metals Research 2000 (13) 199-206.
- [8] *John Campbell*: Castings, Elsevier Science Ltd., Oxford, 2003
- [9] *Gyurán László*: Stronciumos nemesítés és azzal összefüggő elemzések, szemcsefinomítás, Tanulmány (2006), Le Belier Magyarország Formaöntőde Rt. Ajka
- [10] *G. K. Sigworth*: The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects, American Foundry Society, 2008
- [11] *H. R. Ammar, A. M. Samuel, F. H. Samuel*: Effects of Mg-addition, Sr-modification and solidification rate on the tensile properties and quality index of 359 type Al-Si-Mg casting alloys, American Foundry Society, 2011
- [12] *A. K. Prasada Rao, K. Das, B. S. Murty, M. Chakraborty*: On the modification and segregation behavior of Sb in Al-7Si alloy during solidification, Science Direct, 2007
- [13] *Wolfgang Hops*: Metallurgie of Al alloys FOSECO kiadvány (2005)
- [14] *Fegyverneki Gy.*: Al-hengerfej öntvények repedés érzékenysége, PhD értekezés, Miskolc, 2007
- [15] *B. Xiufang, W. Weimin, Q. Jingyu*: Liquid structure of Al-12.5%Si alloy modified by antimony, Elsevier, 2000
- [16] *X.- G. Chen, S. Engler*: „Einfluss des Wasserstoffgehaltes auf die Porosität von Aluminium- Silizium- und Aluminium- Magnesium- Legierungen“; Gießerei 78, 1991, S. 679- 684
- [17] *L. Heusler, W. Sneider*: Recent investigations of influence of P on Na and Sr modification of AlSi alloys, American Foundry Society, 1997
- [18] *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)

- [19] Szombatfalvy Anna: Öntészeti Al-ötvözetek olvadékezelési technológiájának vizsgálata (2007) Diplomamunka
- [20] Dr. Kékesi Tamás, Horváth Csaba, Majtényi József: Az öblítőgázos alumíniumolvadék tisztítás hatékonyságát befolyásoló fő jellemzők kísérleti vizsgálata BKL 141. évfolyam, 2. szám (2008) 25-32. old.
- [21] G. K. Sigworth: Understanding quality in aluminum casting, American Foundry Society, 2011
- [22] Foseco Foundry Practice Issue 242 September 2004: Foundry experiences with a new electrochemical sensor for determining hydrogen concentrations in aluminium alloys
- [23] C. E. Ransley, D.E.J. Talbot: „Wasserstoff- Porosität in Metallen unter besonderer Berücksichtigung des Aluminiums und seiner Legierungen“; Z. Metallkunde 46, 1955, S. 328- 337
- [24] D. E. J. Talbot: „Effects of H in Al, Mg, Cu and their alloys,” Int. Metall. Rev., vol. 20 1975. (12), pp. 166-184,
- [25] P. R. Anyalebechi: „Analysis of the effects of alloying elements on hydrogen solubility in liquid aluminium alloys,” Scr. Metall Mater., vol. 33 (8), pp. 1209-1216, 1995.
- [26] C. J. Simensen, G. Berg: „A Survey of Inclusions in Aluminium“; Aluminium 56, 1980, S. 335- 340
- [27] C. E. Eckert: „Inclusions in Aluminium Foundry Alloys“; Modern Casting, Nr.4 1991, S. 28- 30
- [28] X. G. Chen, S. Engler: „Wasserstoff und Porosität in Aluminium- Silicium- und Aluminium- Magnesium- Legierungen“; Metall 45,1991, S. 995- 1000, S. 1125- 1231.
- [29] X. - G. Chen, J. E. Gruzleski: „Influence of melt cleanliness on pore formation in aluminium- silicon- alloys“; Int. J. Cast. Metals Nr.9, 1996, S.17- 26
- [30] J. Runyoro, S. M. A. Boutorabi, J.Campbell: „Critical Gate Velocities for Film-Forming Casting Alloys: A Basis for Process Specification“; AFS Transactions 102, 1992, S. 225- 234
- [31] Pacz A.: USA Patent, Nr. 1.387.990. 1921.08.12.
- [32] H. Iwahori, K. Yonekura, Y. Yamamoto, M. Nakamura: Mikroporosität und Speisungsverhalten von mit Natrium und Strontium veredelten Aluminium-Silicium-Legierungen“; Gießerei-Praxis, Berlin, Nr.3, 1992, S. 29-36
- [33] W. Kätzlitz: „On-line Messung des Wasserstoffgehaltes in Aluminiumschmelzen“; Giesserei-Praxis 11/2006, S. 339- 341.
- [34] <http://www.mk-gmbh.de>
- [35] Matthew Otho Otte: Porosity Formation in AlSi9Cu3 Alloy Casting: The influence of Iron, Strontium, Sodium, Antimony and Bismuth (PhD thesis work; Department of Mining, Minerals and Materials Engineering, The University of Queensland, Australia, 2000.)
- [36] S. N. Tiwari, J. Beech: „Origin of Gas Bubbles in Aluminium“; Metal Science, 1978, S. 356 - 362

- [37] S. M. Wolf, A. P. Lewitt, J. Brown: „Whister-Metal Matrix Bonding“; Chemical Engineering Progress, 1966, Nr.3, S. 74-78
- [38] W. Thiele: „Die Oxidation von Aluminium und Aluminium- Legierungs- Schmelzen“; Aluminium 38, 1962, S.707- 715, und S. 780- 786
- [39] „Aluminium Gußlegierungen“, Hrsg.: Vereinigung Deutscher Schmelzhütten, Düsseldorf, 1988
- [40] VDG-Merkblatt S 601, „Beurteilung der Qualität von Aluminiumgußlegierungsschmelzen“, Düsseldorf, 1988
- [41] Chen, X. G.; Engler, S.: „Qualitätskontrolle der Aluminiumschmelze-Ein Überblick, Teil I: Oxidation und Oxidgehalt“, Gießerei-Praxis 1992, Nr. 23/24, S. 375-385
- [42] J. A. Taylor: “Metal-related castability effects in aluminium foundry alloys”, Cast Metals, vol. 8, Nr.4, S. 225-252
- [43] Arbenz, A.: „Qualitätsbeschreibung von Aluminium-Gußstücken anhand von Gefügemerkmalen“, Giesserei 66,1979, Nr.19, S. 702-711
- [44] Deveaux, H.; Hiebel, D.; Richard, M.: Filtrationstechniken für Aluminium-Gußlegierungen, Giesserei 78, 1991, Nr. 5, S. 141-145
- [45] Ransley, C.E. ; Talbot. D.E.J.: „Wasserstoffporosität in Metallen unter besonderer Berücksichtigung des Aluminiums und seiner Legierungen“
- [46] Cleanliness measurement using the Prefil-Footer, Beitrag zur Kenntnis des Zusammenhanges zwischen Gasgehalt und Verunreinigungen in Aluminiumschmelzen, Z. Metallkunde 59, 1968, S.757-769
- [47] Ivanov, V.P.; Spasskij, A.G.: Der Einfluß der Aluminiumoxide auf die Gassättigung und die Gasausscheidung im Aluminium und seinen Legierungen, Litejnoe Proizvodstvo in Deutsch, 1963, Nr. 1, S. 29-31
- [48] Neff, D.V.: Metallurgy and melt treatment of aluminium-silicon alloys, 5th Australian Asian Pacific Conference Aluminium Cast House Technology, TMS, USA 1997
- [49] Apelian, D.: How clean is the metal you cast? The issue of assessment: A status report, Proc. Of 3rd Intern. Conference on Molten Aluminum Processing, AFS, USA 1992
- [50] Fischer, J.; Kraft, G.: Die Oxidbestimmung im Aluminium und seinen Legierungen, Giesserei 51, 1964, Nr. 21, S. 659-662
- [51] Fischer, J., Kästner, W.; Aschehoug, H.: Die Bestimmung des Sauerstoffgehaltes von Aluminium und seinen Legierungen, Gießerei, 58, 1971, Nr. 22, S. 680-684
- [52] Aschehoug, H.: Sauerstoff und seine Bestimmung in Aluminium und Aluminiumlegierungen, Gießerei-Forschung 25, 1973, Nr. 2, S. 81-86
- [53] Dautre, D.; Gariépy, B.; Martin, J. P.; Dubé, G.: Aluminium Cleanliness: methods and applications in process development and in quality control, Light Metals 1985, S. 1179- 1195
- [54] Leconte, G.B.; Buxmann, K.: Art und Entstehung von Verunreinigungen in Aluminiumschmelzen, Aluminium55, 1979, Nr.5, S. 329-331

- [55] *de la Sablonnière, H.; Samuel, F. H.*: PoDFA Measurements of Inclusions in 319.1 Alloy: Effect of Mg (0,45Wt%) Addition and Role of Sludge, AFS Transactions 1996, S. 751- 761
- [56] *Krug, H. P.; Schneider, W.*: A contribution to inclusion measurements after in-line degassers with PoDFA and LiMCA, Light Metals 1998, S. 863-870
- [57] *Samuel, F. H.; Quellet, P.; Simard, A.*: Assessment of melt cleanliness and analysis of inclusions in Al-Si alloys using the Prefil pressure filtration technique, Int. J. Cast Metals Res., 12, 1999, S. 17-33
- [58] *Rochette, P.; Simard, A. A.*: Cleanliness measurement using the Prefil-Footerprinter Instrument, Aluminium 76, 2000, Nr. 1/2 , S. 20-26
- [59] *Dupuis, C.; Dumont, R.*: The impact of LiMCA technology on the optimization of metal cleanliness, Light Metals 1993, S. 997-1002
- [60] *Li, M.; Guthrie, R. I. L.*: On the detection and selective separation of inclusions in Liquid Metal Cleanliness Analyzer (LiMCA) Systems, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 31B, 2000, S. 767-777
- [61] *Chen, X. G.; Guthrie, R. I. L.; Gruzleski, J. E.*: Quantitative measurement of melt cleanliness in aluminium-silicon casting alloys, Proc. Of the 4th Int. Conf. on Molten Aluminium, AFS 1995, S. 15-28
- [62] *Krug, H. P.*: személyes tájékoztató, 2003, Hydro Aluminium Deutschland GmbH.
- [63] *Chen, X.-G.; Engler, S.*: Bestimmung des Wasserstoffgehalts und der Porosität in Aluminiumlegierungen, Gießerei 76, 1989, Nr. 22, S. 767-774
- [64] *Painchaud, F.*: The new AISCAN analyzer: Easy to use, reliable, on-line measurement of hydrogen in liquid aluminum alloys, 2nd Int. conf. on molten aluminium processing, Orlando, USA 1989, S. 20.1-20.21
- [65] *Chen, X.-G.; Klinkenberg, F.-J.; Engler, S.*: Qualitätskontrolle der Aluminiumschmelze- Ein Überblick, Teil II: Wasserstoffaufnahme und Wasserstoffgehalt, Gießerei-Praxis 1993, Nr. 1/2, S. 14-26
- [66] *Hielscher, U.*: "Qualitätsorientierte Schmelzeprüfung in der Aluminiumgießerei", Giesserei 74, 1987, S. 695-700
- [67] *Fox, S.; Campbell, J.*: Visualisation of oxide film defects during solidification of aluminium alloys, Scripta mater. 43, 2000, S. 881-886
- [68] *Enright, P.G.; Hughes, I.R.; Pickering, J.*: Characterisation of Molten Metal Quality Using the Pressure Filtration Technique, AFS Transactions, 2003, p. 193-203, Deutsche Übersetzung in: Giesserei-Praxis 2004, Nr. 12, S. 455-459
- [69] *Habibi, N.; Samuel, A.M.; Rochette, P.; Paquin, D.*: Effect of grain refining and Sr modification on Prefil measurement sensitivity in 356 alloys using electron probe microanalysis technique, Int. Journal of Cast Metals Research, 2004, Vol. 17, No. 2, p. 79- 87
- [70] *Kaptay Gy.*: Határfelületi jelenségek a fémcsanyaggyártásban. 2. rész. A határfelületi összehúzó erő. BKL Kohászat, 2009., 142. évf., 6. szám, 37-46. o. Hivatkozás 22.
- [71] *M. C. Flemings*: Solidification Processing: McGraw-Hill, Inc., 1974

- [72] *D. G. Mallapur, S. A. Kori, K. Rajendra Udupa*: Influence of Ti, B and Sr on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy, *J Mater Sci* (2011) 46:1622-1627 DOI 10.1007/s10853-010-4977-3
- [73] *Andreas Kessler, Franz Josef Feikus, Gotthard Wolf*: Messung nichtmetallischer Verunreinigungen in Aluminiumgusslegierungen mit der Prefil-Methode, Düsseldorf, Giesserei 96 02/2009 16-31.
- [73] *Tokár Monika, Tóth Márta, Dúl Jenő, Fegyverneki György*: Szennyezőelemek változékonysága az öntészeti AlSi-ötvözetekben, *Anyagmérnöki Tudományok*, 37. kötet, 1. szám (2012), pp. 413–421.
- [74] *Kaptay György*: Az Al-Si-Mg-Sr(Sb)-N sórendszerben kialakuló zárványokról személyes konzultáció
- [75] *Helmut Jaunich*: Entgasen und Reinigen von Aluminiumschmelzen in Gießereien
- [76] *D. W. Pattle*: Advances in degassing aluminium alloys, *The Foundryman*, 5. 1988, 232-235.
- [77] *Johansen, S. et al.*: Bubble size and mass transfer mechanics in rotor stirred reactors, *Light Metals* 1997, 663-666
- [78] *Johansen, S. et al.*: Can rotor based refining units be developed and optimised based on water model experiments? *Light Metals* 1998, 805-810
- [79] http://edoc.bibliothek.uni-halle.de/servlets/MCRFileNodeServlet/HALCoRe_derivate_00003911/J.Pavlovic-Krstic_PhD_Thesis-new.pdf
- [80] <http://www.gucosa.de/fileadmin/data/gucosa/documents/2299/WerkstofftechnologieVogelVera167915.pdf>
- [81] http://www.gucosa.de/recherche/frontdoor/?tx_slubopus4frontend%5bid%5d=urn:nbn:de:swb:105-9262821
- [82] *Tóth Márta*: Al-Si öntészeti ötvözetekben előforduló szennyező elemek vizsgálata, Diplomaterv, 2012. január
- [83] *Varga Bálint*: Nyári gyakorlat beszámoló, Le Beliere Hongrie Formaöntöde Zrt.
- [84] *Gergely Gréta*: A stroncium és az olvadékáramlás hatása az Si morfológiájára, Al7Si0,3Mg ötvözet esetén PhD értekezés 2008.
- [85] *Kósa Anett*: A stroncium hatása az Al-Si öntészeti ötvözetek szerkezetére Diplomamunka 2011.

9. Az értekezés témaköréből megjelent saját publikációk

<https://vm.mtmt.hu//search/slist.php?lang=0&AuthorID=10029165>

Szakkikkek:

1. Dúl Jenő - Gyurán László - Szombatfalvy Anna: Járműipari öntészeti alumíniumolvadékok tulajdonságainak optimalizálása Bányászati és Kohászati Lapok 140.évf. 2007/3. szám 15-19. old.
2. Szombatfalvy, J. Dúl: Optimizing the Features of Al-Melts of Automotive Industry Casting, Materials Science and Engineering, Series II. Volume 35. (No.2) pp 75-84., 2010.06.30.
3. Szombatfalvy, M. Djurdjevic, J. Dúl, Gy. Fegyverneki: Optimization of the AlSr10 Master Alloy Addition into AlSi6Cu4 Alloys, Materials Science and Engineering Series II. Volume 35. (No.2) pp 85-93., 2010.06.30.
4. Anna Szombatfalvy, Dr. György Fegyverneki, Dr. Jenő Dúl: Optimierung der Schmelzebehandlung von AlSi-Gusslegierungen für Automotive-Anwendungen, Giesserei-Praxis 2011/11, Seite pp.523-533.

Konferencia kiadványban megjelent cikkek:

1. Anna Szombatfalvy: Optimizing the Features of Al-melts of Automotive Industry Casting; 15. International Students' Day of Metallurgy, Freiberg 13-15/03/2008: Conference Issue: (75-78.p.)
2. Szombatfalvy Anna: Öntészeti Al-Si olvadékok zárványtartalmának csökkentési lehetőségei olvadékezeléssel, Bányászati-Kohászati és Földtani Konferencia, Máramarossziget, Románia, 2009.04.04.; Kiadvány, pp 87-91. ISSN 1842-9440
3. Anna Szombatfalvy: Reduction possibilities of inclusions with melt treatment in casting Al-Si melts, International Students' Day of Metallurgy 2009, Ostrava, Cseh Köztársaság; 2009.04.24. CD-kiadvány, 12 p.
4. Anna Szombatfalvy: Inclusion examination of foundry aluminium alloys, International PhD Foundry Conference 2009, WTF 2009, 46th Foundry Days, Brno, Cseh Köztársaság; 2009.06.03. CD-kiadvány, p.12
5. Anna Szombatfalvy, Mile Djurdjevic, Jenő Dúl, György Fegyverneki: Optimization of the AlSr10 Master Alloy Addition into AlSi6Cu4 Alloys, 4th International Conference Processing and Structure of Materials, Serbia, Palic, Konferenciakiadvány pp55-50. ISBN 978-86-87183-17-9, 2010.05.27.
6. Szombatfalvy Anna, Dr. Dúl Jenő: Öntészeti Al-Si-ötvözet-olvadékok tulajdonságainak vizsgálata az oldott gáztartalom és a zárványtartalom változása alapján, XII. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Nagyenyed, Románia, Konferenciakiadvány pp.94-97. ISSN 1842-9440, 2010.04.10.

Szóbeli előadások:

10. Szombatfalvy Anna: Stronciumos nemesítés bevezetésének üzemi vizsgálata, XIX. Magyar Öntőnapok, Lillafüred, 2007.10.14.
11. Anna Szombatfalvy: Optimizing the features of Al-melts of automotive industry casting, 44th Foundry Days, Brno, 2007. október 16-17.
12. Anna Szombatfalvy: Optimizing the Features of Al-melts of Automotive Industry Casting, 15. International Students' Day of Metallurgy, Freiberg, 2008. 03.13-15.
13. Szombatfalvy Anna: Öntészeti Al-olvadékok zárványtartalmának vizsgálata, ME Doktoranduszok Fóruma, 2008.11.13.
14. Anna Szombatfalvy: The effect of strontium to the solidification of Al-Si melts, Fifth International Conference on Solidification and Gravity Miskolc, Lillafüred 2008.09.1-4. (poszter előadás)
15. Anna Szombatfalvy: Optimizing the features of Al-melts of automobil industry casting, Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Máramarossziget; 2009.04.04. (poszter előadás)
16. Szombatfalvy Anna: Öntészeti Al-Si olvadékok zárványtartalmának csökkentési lehetőségei olvadékezeléssel, Bányászati-Kohászati és Földtani Konferencia, Máramarossziget, Románia, 2009.04.04.
17. Anna Szombatfalvy: Reduction possibilities of inclusions with melt treatment in casting Al-Si melts, International Students' Day of Metallurgy 2009, Ostrava, Cseh Köztársaság, 2009.04.24.
18. Anna Szombatfalvy: Inclusion examination of foundry aluminium alloys, International PhD Foundry Conference 2009, WTF 2009, 46th Foundry Days, Brno, Cseh Köztársaság; 2009.06.03.
19. Szombatfalvy Anna, Dr. Dúl Jenő: Öntészeti Al-Si olvadékok zárványtartalmának csökkentési lehetőségei olvadékezeléssel XX. Magyar Öntőnapok, Tapolca, 2009.10.11.
20. Szombatfalvy Anna, Dr. Dúl Jenő, Dr. Fegyverneki György, Garda Henrietta: Aluminium-öntvények zárványosságának okai és csökkentési lehetőségei, XX.Magyar Öntőnapok, Tapolca, 2009.10.11.
21. Anna Szombatfalvy, Mile Djurdjevic, Jenő Dúl, György Fegyverneki: Optimization of the AlSr10 Master Alloy Addition into AlSi6Cu4 Alloys szóbeli előadás angol nyelven, 4th International Conference Processing and Structure of Materials, Serbia, 2010.05.27.
22. Szombatfalvy Anna, Dr. Dúl Jenő: Öntészeti Al-Si-ötvözet-olvadékok tulajdonságainak vizsgálata az oldott gáztartalom és a zárványtartalom változása alapján, XII. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Nagyenyed, Románia, 2010.04.10.
23. Szombatfalvy Anna, Dr. Dúl Jenő, Dr. Fegyverneki György: Olvadékezelés hatékonyságának vizsgálata, XXI. Magyar Öntőnapok, Győr, 2011. október 14-16.