

Miskolci Egyetem

Anyag- és Vegyészmérnöki Kar



Silafont36 nyomásos öntészeti ötvözet mechanikai tulajdonságainak vizsgálata

Study of the Silafont36 HPDC alloy mechanical properties



Konzulens:

Terék Tamás, technológia vezető

Készítette:

Orosz Adrienn, kohómérnök MSc hallgató

Miskolc, 2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. A SILAFONT36 nyomásos öntészeti ötvözet	5
2.1 Silafont36 kémiai összetétele, mechanikai tulajdonságai öntött és hőkezelt állapotban..	5
2.2 Az eutektikum finomításának jelentősége	7
2.3 Intermetallikus vegyületek megjelenése a Silafont36 ötvözetben.....	8
3. Az alumínium ötvözetek inert gázzal történő tisztítása, olvadékelemzési módszerek	10
3.1 Oldott gáztartalom meghatározása csökkentett nyomás próbával.....	10
3.2 Zárványtartalom meghatározása K-mold teszttel	11
4. Kísérleti eljárások bemutatása és eredményeik I. [13]	12
4.1. Olvadék előállítás és tisztítás.....	12
4.2 Termikus analízis elvégzése	13
4.3 Mechanikai tulajdonságok vizsgálata	13
4.4 Optikai és SEM mikroszkópos vizsgálat	14
4.5 Sűrűség-index és K-mold teszt eredmények	14
4.6 Fluoridmentes takarósó alkalmazásának eredményei	15
4.7 Ötvözés technológiai pontjának meghatározása.....	16
4.8 A hőntartási hőmérséklet hatása az oldott gáztartalomra és a tisztaságra	17
4.9 Különböző mennyiségű magnézium adagolásának eredményei	18
4.10 Termikus analízis eredményei	18
4.11 A mechanikai tulajdonságok vizsgálatának eredményei	20
4.12 Szövetszerkezet vizsgálatainak eredményei	21
4.13 A pásztázó elektronmikroszkóp vizsgálat eredményei.....	22
5. Kísérleti eljárás bemutatása és azok eredményei II.	24
5.1 Kísérleti olvasztási technológia tervezése	24
5.2 Meltec hőntartó kemence előkészítése	25
5.3 Fémhordó tégely előkészítése.....	26

5.4 Olvadéktisztítási és minősítési eljárások	27
5.5 Öntött és hőkezelt szövetszerkezet ellenőrzése	28
5.6 Mechanikai tulajdonságok tesztelése	29
5.7 Olvadékelemzés eredményei	31
5.8 Kezelő hatása a salak fémtartalmára	34
5.9 Szövetszerkezetek eredményei	35
5.9.1 Tömbösített alapanyag szövetszerkezete	35
5.9.2 Öntött szövetszerkezet	36
5.10 Mechanikai tulajdonságok vizsgálati eredményei	38
5.10.1 Kísérleti olvadékból öntött, T5 hőkezeléssel elért eredmények	38
5.10.2 Kísérleti olvadékból öntött, T6 hőkezeléssel elért eredmények	39
6. Összefoglalás	45
7. Irodalomjegyzék	48

1. Bevezetés

A járműipari alkatrészgyártás napjainkban legtermelékenyebbnek mondott eljárásai közé tartozik a nyomásos öntészeti technológia, ahol az alkalmazási terület szempontjából gondosan megválasztott ötvözettypus, és az abból előállított olvadék minősége kiemelten fontos szerepet játszik a vevői igények kielégítése szempontjából. Ebből kifolyólag különböző olvadéktisztítási módszerek és vizsgálatok terjedtek el az öntészeti gyakorlatban, melyek kiemelkedő szerepet töltenek be a megfelelő minőségű olvadék előállításában. A késztermékek főként mechanikai és szilárdsági tulajdonságaira vonatkozó, szigorú követelményeinek teljesíthetősége pedig gyakran az olvadék minőségére vezethető vissza, ezért elengedhetetlen az ötvözettypusnak megfelelő olvasztási, öntési és hőkezelési folyamatok megállapítása, fejlesztése, szükség szerint felülvizsgálata.

Az olvasztástechnológia során jelentkező hibajelenségek az olvadék minőségének romlásához vezethetnek, mely a vevői követelmények megghiúsulását eredményezhetik a késztermékre nézve. Ide sorolhatóak az ötvözetekben kialakuló, vas- illetve mangántartalmú intermetallikus vegyületfázisok, továbbá az olvadék oldott gáztartalma, illetve különböző oxidhárták és zárványok jelenléte, vagy a különböző ötvözőelemek egymással alkotott vegyületei. Az öntészeti hibák előfordulásának minimalizálása érdekében olvadékelemzési eljárásokat alkalmaznak, melyek eredményétől függően beavatkozásokat végeznek az olvasztástechnológiai folyamatokba. Az öntvények mechanikai tulajdonságának javítása érdekében különböző fizikai metallurgiai eljárásokat (hőkezelés) alkalmaznak.

Ebben a dolgozatban a SILAFONT36 (AlSi10MnMg) elnevezésű öntészeti ötvözetből gyártott termék (motorlager adapter, továbbiakban MLA) tulajdonságait vizsgáltam ipari körülmények között. Fontos szempont, hogy a mechanikai tulajdonságok teljesítsék a vevői követelményeket. Ennek érdekében megvizsgáltam a jelenlegi olvasztástechnológiát és olvadéktisztítási folyamatot. A késztermékek és próbatestek vizsgálatával feltérképeztem az olvadék minőségére visszavezethető öntészeti hibák megjelenését, melyek jelentős hatással bírnak a mechanikai tulajdonságokra nézve. Emellett különböző hőkezelési eljárások alkalmazhatóságát és azok mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásait vizsgáltam.

2. A SILAFONT36 nyomásos öntészeti ötvözet

2.1 Silafont36 kémiai összetétele, mechanikai tulajdonságai öntött és hőkezelt állapotban

Az 1990-es években, Németországban alkották meg az első nagysikerű, alacsony vastartalmú ötvözetet (Silafont36, vagy AA365), melyben a vasat 0,15%-on maximalizálták annak érdekében, hogy minimálisra csökkentsék az ötvözet-acélforma közti kémiai reakciókat. A Silafont36 9,5-11,5% tartomány közti szilícium tartalma kitűnő formakitöltő képességet, ezáltal kiváló önthetőséget biztosít. Az 1. táblázat a Silafont36 jellemző kémiai összetételét mutatja be.

1. táblázat A Silafont36 kémiai összetétele [4]

[%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	P	Egyéb
min.	9,5			0,5	0,1		0,04	0,01		
max.	11,5	0,15	0,03	0,8	0,5	0,07	0,15	0,025	0,001	0,1

Annak érdekében, hogy az alumínium-szilícium eutektikum már öntött állapotban finomeloszlású legyen, stronciummal történő módosítást végeznek, mely az eutektikumban priméren kristályosodó, tús jellegű szilícium morfológiáját hivatott módosítani, ezáltal növeli az ötvözet mechanikai tulajdonságait. [3] Emellett, 0,05-0,07%-ban alkalmazott stroncium szintén csökkenti az acélforma és az olvadék közti interakciót, emellett kedvezően hat a vas-mangán vegyületfázisok kristályosodási morfológiájára. [4;6]

Az ötvözet kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, melyek különböző hőkezelési eljárásokkal tovább növelhetőek. A sikerrel alkalmazott hőkezelési eljárások feltétele, hogy az öntvény egyes részei lehetőség szerint anyagfolytonossági hibáktól mentesek legyenek, mely elérése érdekében gyakran vákuummal támogatott öntést alkalmaznak. [1;9;7] A folyáshatár növelése érdekében T5 vagy T6 hőkezelés a célravezető módszer. [7] Az öntött állapotban és az egyes hőkezelési eljárásokkal elért mechanikai tulajdonságokat a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat A mechanikai tulajdonságok változása eltérő hőkezelési paraméterek esetében, 0,29% magnéziumtartalom jelenlétében [4]

Hőkezelt típusa	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	HB
F	96	175	2	61
T4	133	229	4	77
T6	250	299	1	109
T7	222	260	1	90

A Silafont36 ötvözetből öntött termékek magnéziumtartományának és hőkezelések megfelelő megválasztásával a kívánt alkalmazási területnek megfelelő mechanikai tulajdonság érhető el [4;7]. A cégnél alkalmazott ötvözet esetében a Mg tartalom a 0,30-0,45% között került

betűzésre, ahol a gyártói ajánlás szerint a vevők által kívánt szilárdsági tulajdonságok T4 vagy T6 hőkezelés után érhetőek el. A magnéziumtartalom függvényében, öntött állapotban elért mechanikai tulajdonságokat a 3. táblázat szemlélteti. A 4-6. táblázatok különböző magnéziumtartományokban, T5-ös hőkezelési eljárással elért mechanikai tulajdonságokat reprezentálnak [4]:

3. táblázat A Silafont36 mechanikai tulajdonságainak változása öntött állapotban, a magnéziumtartalom függvényében [6]

Magnézium tartalom [%]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
0,30	133	279	8,1
0,33	141	261	6,3
0,42	146	286	5,8

4. táblázat A mechanikai tulajdonságok változása 0,30% Mg tartalom és T5 hőkezelés esetén, 4 mm vastagságú szakítópálca esetében [4]

Megeresztés hőmérséklete [°C]	Megeresztés időtartama [h]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
170	1	157	291	7,1
170	2	169	292	5,0
170	3	185	302	6,0
170	4	188	305	8,5
170	5	197	309	7,1
170	6	195	309	8,5
170	8	201	313	8,9
200	0,5	211	316	8,4
200	1	212	314	7,9

5. táblázat A mechanikai tulajdonságok változása 0,33% Mg tartalom és T5 hőkezelés esetén, 3,8 mm vastagságú szakítópálca esetében [4]

Öregítés hőmérséklete [°C]	Öregítés időtartama [h]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
170	3	193	290	4,5
170	4	199	295	4,8
170	6	206	300	5,0
200	0,5	193	290	5,7
200	1	200	297	5,6
220	0,5	199	293	5,8
250	0,5	180	268	3,5

6. táblázat A mechanikai tulajdonságok változása 0,32% Mg tartalom és T5 hőkezelés esetén, különböző tárolási idővel az 1 h 200°C-on történő öregítést megelőzően, 4mm vastagságú szakítópálca esetében [4]

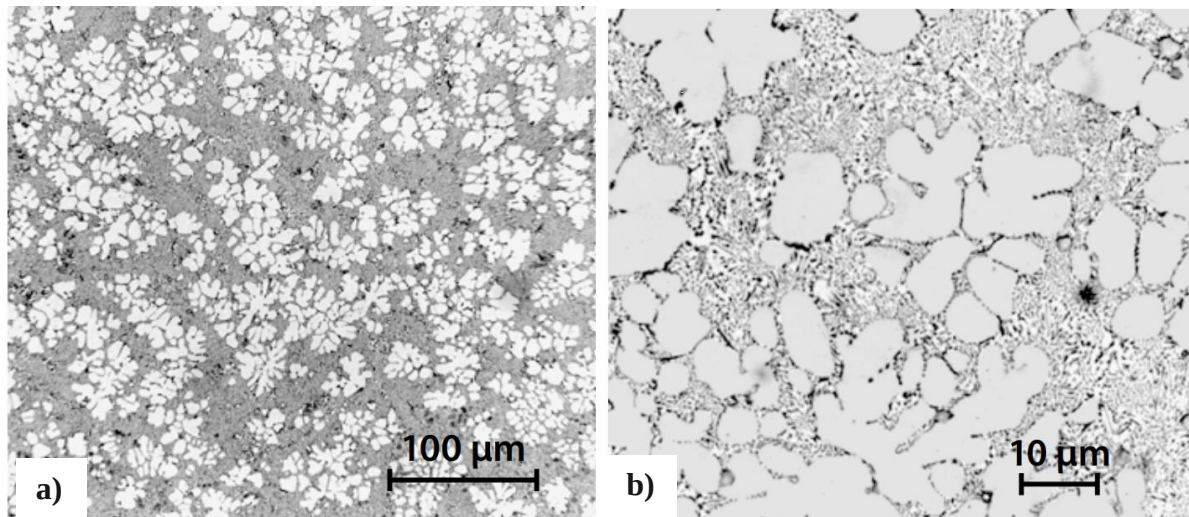
Öntött állapotban történő tárolás [h]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1	207	307	6,9
10	233	324	6,6
72	232	324	6,8

A táblázatban összefoglaltak alapján látható, hogy a folyáshatár az öntött állapothoz képest akár 100 MPa-al is növelhető, a szakítószilárdság pedig bizonyos esetekben a 300 MPa-t is meghaladja. A nyúlás értékeit tekintve elmondható, hogy számottevően nem csökken, mindvégig az 5-9% tartományban marad. A legmagasabb folyáshatár értékeket 0,30% magnéziumtartalom felett, az öntés és öregítés között legalább 10 óra elteltével érték el. [4]

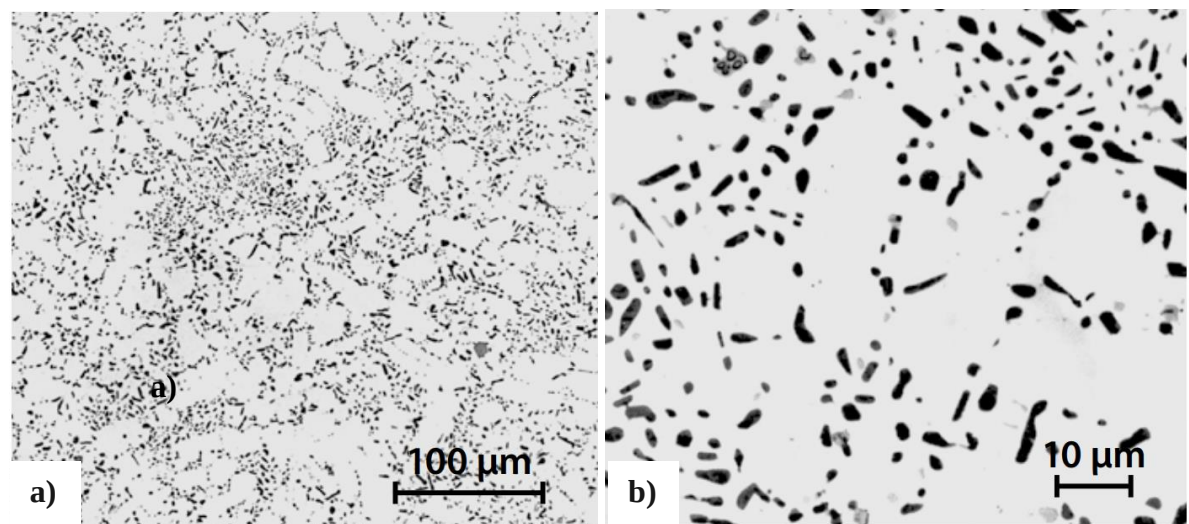
2.2 Az eutektikum finomításának jelentősége

Az autóiipari öntvényeknek jó deformációs tulajdonságokkal kell rendelkezniük, mely meglétének egyik legfontosabb feltétele, hogy az ötvözet vastartalmát a lehető legalacsonyabb értéken tartsák, hogy az AlFeSi kiválások arányát a lehető legkisebbre redukálják. A tűs (lemezes) morfológiával kristályosodó vas kiválások megszakítják a szövetszerkezet folytonosságát, feszültséggyűjtő helyekként funkcionálnak [8], melyek a repedések kialakulásának kiindulópontjai, különösképp dinamikus terhelések estén, amely a nyúlási értékeket jelentős mértékben rontja. [4] Ebből kifolyólag a vas értékét 0,15%-on maximalizálták, a mangántartalmat pedig kb. 0,65%-ra emelték a silafont esetében. A vassal ellentétben a mangán megjelenési formája nem tűs, hanem globulitos. [4] A finomszerkezetű eutektikum előidézéséhez olyan vizsgálatokat végeztek, mely során az Fe <0,15%, a Mg <0,19%, a Sr tartalom pedig 130 és 170 ppm közt volt tartva, mely az eutektikum megfelelő módosítását biztosította. [4] Az eutektikum módosított állapota megfigyelhető az α -Al dendritek között (1.a ábra), melyben a világosszürke $Al_{12}Mn_3Si_2$ fázisok is megjelentek, globulitos morfológiával.

Pusztán az öntvények gyors hűtése a nyomásos öntészetben nem elegendő ahhoz, hogy a darabok öntött szövetszerkezete megfeleljen az előírt nyúlási értékeknek. A stronciummal végzett eutektikum módosítás elengedhetetlen (1.b ábra). A nyúlási paramétert kedvezően befolyásolja az oldó hőkezelés, mellyel elért szövetszerkezetet a 2. ábra szemléltet. [4]



1. ábra Silafont36 ötvözetből öntött, nyomásos termékek szövetszerkezete öntött állapotban, stroncium hozzáadásával a) 100X és b) 500X nagyításban [4]



2. ábra Silafont36 ötvözetből öntött, nyomásos öntvények szövetszerkezete T5 hőkezelés után a) 100X és b) 500X nagyításban [4]

2.3 Intermetallikus vegyületek megjelenése a Silafont36 ötvözetben

A Silafont36 alapvetően egy alacsony vastartalmú Al-Si-Mn-Mg ötvözetcsaládba sorolható ötvözet, melyben a vas szennyezőként van jelen. A vas tiszta alumíniumban Al_3Fe vagy Al_6Fe , míg az Al-Si ötvözetrendszerben $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ fázisokként jelenik meg, leggyakrabban a dendritek határán, illetve a szekunder dendritágakkal párhuzamosan. A dermedés során ezek a fázisok képesek az $\alpha\text{-Al}$ dendritágak közé nőni. Az intermetallikus vegyületek kiválása és megdermedése még azelőtt végbemegy, hogy az alumínium ötvözet eutektikus reakciói elkezdődnének, [9] ezért fontos a vas káros hatásait ötvözőelemekkel kompenzálni. Ilyenek pl.: Mn, Cr, Sr, Co, Be, amik a vasra jellemző, tűs kiválások helyett kevésbé káros, gömbszerű, vagy poligon morfológiájú kristályosodást tesznek lehetővé. A stroncium amellet, hogy

elősegíti az eutektikum módosítását, pozitív hatást gyakorol a β -Al₅FeSi vegyületek kiválása során, ugyanis a stroncium alkalmazásával ezen vegyületek kedvezőbb morfológiával jelennek meg az ötvözet szövetszerkezetében, [3;11;12] ami a mechanikai tulajdonságok javulásában is szerepet játszik. [8]

3. Az alumínium ötvözetek inert gázzal történő tisztítása, olvadékelemzési módszerek

Az alumínium oxigénhez való nagy affinitása és a hidrogénoldó képessége indokolja az olvadéktisztító módszerek alkalmazását, azon belül is leggyakrabban a kémiai inert gázzal történő öblítéssel eljárásokat. Ekkor az olvadék teljes térfogatán passzív gáz átbuborékoltatása történik, leggyakrabban nitrogén, argon vagy hélium alkalmazásával. [2] Az olvadék gáztalanítási folyamatának hajtóereje a diffúzió és a konvektív mozgás együttes hatása. [2] A hidrogén atomok a tisztítógáz felületén adszorbeálódnak, majd azok belsejében molekulákká alakulnak. A buborékok az olvadék felszíne felé haladva végül távoznak a környezeti levegőbe. Az inert gázokkal (argon, nitrogén) történő olvadéktisztítás hatékonysága jelentősen függ a passzív gázbuborékok méretétől és a fürdőben való eloszlásuktól, melyet a rotorszár fordulatszáma és a fej geometriája határoz meg. Az öblítógáz hatékonyságának növelése érdekében alkalmazzák az ún. terelőlapátot/hullámtörőt. A lapát turbulens áramlási viszonyokat idéz elő környezetében, ezzel növelve az öblítógáz buborékok felszínre úszásának idejét, ez idő alatt több hidrogén diffundálhat a tisztítógáz buborék belsejébe.

A kezelősókkal kombinált rotoros tisztítási folyamatok jelentős mértékben hozzájárulnak a késztermék mechanikai tulajdonságainak javulásához. [5] Az olvadékelemző sók jellemző alkotói [2] a kloridok, melyek folyósítják a kezelősó-olvadékot; fluoridok, melyek csökkentik a határfelületi feszültséget a sóolvadék és az oxidzárványok felülete között, ezáltal jobb nedvesíthetőséget kölcsönöznek és megkönnyítik a zárványok olvadékból történő eltávolítását. A sókban jelen vannak még egyéb, oxidáló vegyületek, melyek exoterm kémiai reakciók lejátszódása lévén lokálisan megemelik a hőmérsékletet, melynek köszönhetően csökken a sóolvadék viszkozitása, ezáltal nő az oxidok nedvesíthetősége, elősegítve a salakban lévő alumínium olvadékcseppek koagulálását.

3.1 Oldott gáztartalom meghatározása csökkentett nyomás próbával

Az olvadék oldott gáztartalmára enged következtetni a csökkentett nyomás próba, melynek során két előmelegített acéltégelybe öntenek mintát. A folyamat során az egyik minta normál légköri nyomáson, a másik 80 mbar alatt szilárdul meg. A levegőn szilárdult minta sűrűsége nagyobb, mint a vákuum alatt szilárdult testé, mert a kivált és megnőtt gázbuborékok csökkentik a vízbe mártott test sűrűségét. A próbatesteket szobahőmérsékletre történő hűlése után Archimédesi-mérlegen mérik meg, két eltérő – levegő és víz – közegben. Az eltérő sűrűség értékekből a mérleg az oldott gáztartalomra nézve adja meg DI% (Dichte Index, vagy Density

index %) értékét (1. képlet). Ha DI értéke a megengedett maximális értéknél kisebb, akkor az olvadék megfelelőnek tekinthető gáztartalomra nézve.

$${}^1DI = \frac{D1 - D2}{D1} * 100 [\%] \quad (1)$$

3.2 Zárványtartalom meghatározása K-mold teszttel

Az olvadék tisztaságának minősítésére az egyik leggyakrabban alkalmazott üzemi vizsgálati módszer a K-mold teszt, mely során egy előmelegített, törőélekkel ellátott acél öntőformába olvadékot öntenek. A kokillába öntött olvadékban jelen lévő zárványok a törőélek mentén halmozódnak fel, ezáltal láthatóvá válnak a töretfelületeken. A kiértékelés során összeszámolják a töretfelületen megjelenő zárványokat, így a módszer jelentős szubjektivitással rendelkezik. A 2. képlet alapján, a töretfelületen lévő zárványok darabszámát az összes vizsgált töretfelülettel elosztva kapható meg K-értéke [10], amely az olvadék tisztaságát fejezi ki:

$${}^2K = \frac{S}{n} \quad (2)$$

A fém tisztaságát a zárványtartalom függvényében a szakirodalom által meghatározott K érték szerint értékeljük, ahogy azt a 7. táblázat is mutatja.

7. táblázat Az olvadék minősítése zárványtartalom szempontjából, szakirodalom szerint [2]

Besorolás	K-érték	Olvadékminőség
A	<0,1	Nem szennyezett
B	0,1-0,5	Viszonylag tiszta
C	0,5-1,0	Bizonyos mértékig tiszta
D1	1,0-2,0	Szennyezett
D2	2,0-5,0	
D3	5,0-10	
E	>10	Nagyon szennyezett

¹ ahol: DI: sűrűség-index (%); D1: Normál légköri nyomáson megszilárdult próbatest referencia sűrűsége (g/cm³); D2: 80 mbar nyomáson kristályosodott minta sűrűsége (g/cm³)

² ahol: S: a vizsgált töretfelületeken lévő zárványok száma; n: a vizsgált töretfelületek száma

4. Kísérleti eljárások bemutatása és eredményeik I. [13]

4.1. Olvadék előállítás és tisztítás

Az ötvözet olvasztása földgáztüzelésű, 1t/h kapacitású kétaknás Striko Westofen olvasztókemencében történt, 50-50% visszatérő hulladék-tömb arányban. Az olvasztókemence pihentető térrészeiben, 7 l/min térfogatárammal nitrogénnel történő öblítést végeztem. A technológiai utasítás értelmében 770°C-ra való túlhevítést alkalmaztam annak érdekében, hogy az olvadék a rotoros kezelést és kiszállítást követően is teljesítse az elvárt betöltési hőmérsékletet. Szintén ezt a célt szolgálja a fémhordó tégely 230 jelölésű (EN AC-44300) ötvözet olvadékkal történő előmelegítése. A 8. táblázat a 230-as fémötvözet kémiai összetételét szemlélteti.

8. táblázat A 230-as jelölésű alumíniumötvözet kémiai összetételére vonatkozó tűrések

[%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	P
min.	10,5	0,45							
max.	11,5	0,9	0,08	0,55	0,05	0,15	0,15	0,05	0,05

A Sialfont36 esetében a magnézium és a stroncium koncentráció csökkenésével kell számolni a beolvasztási periódus végére, ezért a stroncium koncentráció korrekciójához AlSr10 előötvözetet, a magnézium pótlására AlMg65 előötvözetet használtam, az adagolandó mennyiséget spektrometriai minták eredménye alapján számoltam. A magnézium előötvözetet az olvasztókemence pihentető térrészebe ötvöztem, majd az olvadék átmozgatása után 30 percig pihentettem azt. Az ötvözést minden esetben kémiai mintavétellel ellenőriztem. A 9. táblázat a Silafont36 kémiai összetételét mutatja be.

9. táblázat A Silafont36 kémiai összetételének határértékei

[%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	P
min.	9,0			0,4	0,3			0,01	
max.	11,5	0,25	0,05	0,8	0,45	0,07	0,12	0,027	0,05

A 230-as olvadékkal előmelegített fémhordó tégelybe történő csapolás után FOSECO Rotostativ MTS 1500 rotoros olvadéktisztító berendezéssel végeztem az olvadék kezelését. A stronciumot a kezelés megkezdése előtt a tégelybe adagoltam. A külső gáztalanítás időtartama 6 perc/tégely, ahol egy tégelyben lévő átlagos olvadékmennyiség 360-380 kg. Az olvadékkezelés során alkalmazott paramétereket a 10. táblázat foglalja össze.

10. táblázat A rotoros olvadéktisztítás jellemző paraméterei

Előkeverés, rotorfej öblítés	10 s
Vortex létrehozás	0 s
Sóadagolás ideje	0 s
Reakcióidő	0 s
Gáztalanítási idő	360 s
Fordulatszám	380 rpm
Öblítőgáz (N₂)	18 l/min

Az olvadéktisztítási folyamat megkezdése előtt, illetve a tisztítási folyamat végbemenetele után történt a mintavételezés mind sűrűség-index, mind zárványtartalom vizsgálatra. Oldott gáztartalom vizsgálathoz az öntőgéphez csatlakozó, túlnyomásos rendszerrel működő, Striko Westofen gyártmányú adagoló hőntartó kemencéből is vettem mintát, annak feltöltése után. A termékek öntése 13000 kN záróerejű, IDRA öntőgépen történt.

4.2 Termikus analízis elvégzése

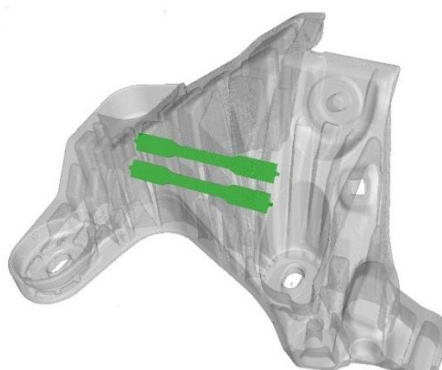
Az olvadék dermedése során egyes fázisok kiválása, vagy átalakulása hőfelszabadulással jár, melyek a levett minta lehűlési görbéjének első derivált görbéjén válnak láthatóvá. Esetünkben a magnézium hasznosulását vizsgáltam termikus analízis alkalmazásával, ugyanis az olvadékban jelen lévő, oldott magnézium kiválása az ötvözet dermedése során szintén látens hő felszabadulása mellett megy végbe. A derivált görbén látható magnézium csúcsok intenzitása egyenesen arányos az olvadékban jelen lévő aktív magnézium mennyiségével.

4.3 Mechanikai tulajdonságok vizsgálata

A mechanikai tulajdonságok növelése érdekében 1h 200°C megeresztést alkalmazunk Hofmann Prothermo berendezésekben. A mintákat a forgácsoló üzemben munkáltattam ki öntvényeinkből, a vevők által meghatározott öntvényrészekből, melyeket a 3. ábra szemléltet. Az öntvényekkel szemben támasztott vevői követelmények, öntött állapotra vonatkozóan a 11. táblázatban láthatóak. A szakítóvizsgálatokat INSTRON TM-30 berendezéssel, ISO 6892-1: 2019 szabvány, A method szerint végeztem 8 mm széles, 3 mm vastag hasáb alakú próbatestek alkalmazásával.

11. táblázat Az előírt követelmények mechanikai tulajdonságra nézve

Folyáshatár [MPa]	Szakítószilárdság [MPa]	Nyúlás [%]
130	260	min. 5



3. ábra Szakító próbatestek kimunkálása a Motorlager adapter termék esetében

4.4 Optikai és SEM mikroszkópos vizsgálat

A minták metallográfiai előkészítése után 0,5%-os HF vizes oldatában, 15 másodpercig marattam azokat, majd optikai mikroszkóppal készítettem felvételeket. A szövetszerkezetben jelen lévő kiválások összetételének meghatározásához SEM vizsgálatokat végeztem.

4.5 Sűrűség-index és K-mold teszt eredmények

Az olvadék oldott gáztartalmára és tisztaságára irányuló mérési eredményeket 770°C-os hőntartás mellett a 12. táblázat mutatja be. A belső gáztalanítás (TBG) az olvadéknak az olvasztó kemence pihentető térrészeiben végzett, nitrogénnel történő öblítése, külső gáztalanítása pedig (TKG) a rotoros olvadéktisztítási eljárás. Az olvadék elvárt oldott gáztartalma <2 DI%.

12. táblázat 770°C-on hőn tartott olvadék oldott gáztartalma és tisztasági mutatói

Mintavételi hely	Sűrűség-index [DI%]	K-mold [K]
TBG	11,5	0,32
TKG	2,9	1,23
HT	5,6	–

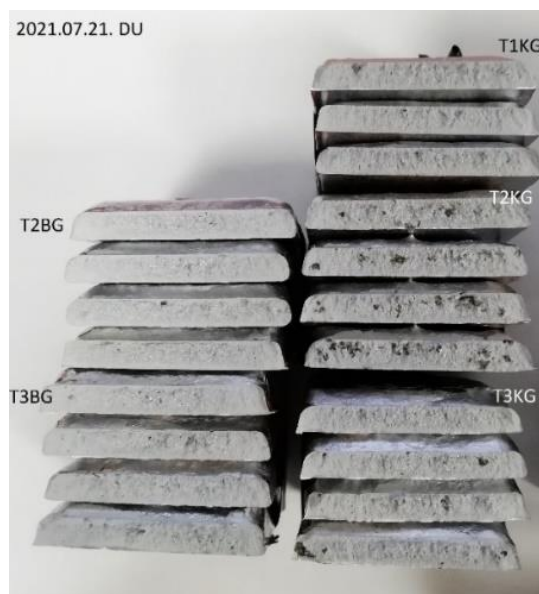
A gyártói ajánlás alapján emelt hőntartási hőmérséklet kedvezőtlenül hat az olvadék gáztartalmára, így a gáztalanítási folyamatot követően ugyan sikerül elérni a 2% értéket, azonban a hőntartó kemencében (HT) folyamatos sűrűség-index emelkedés volt tapasztalható. Az emelkedés a hőntartási hőmérséklettel és az olvadék magnéziumtartalmával magyarázható. A sűrűség-index mérésekkel párhuzamosan vett K-mold minták eredményei alapján elmondható, hogy a belső gáztalanítás után vett minták tisztasági értékre megfelelőek, a külső gáztalanításból származó minták töreke viszont nem megfelelő, nagy kiterjedésű zárványok figyelhetők meg azokon (4. ábra)



4. ábra A TBG minták (bal oszlop) és a TKG minták (jobb oszlop) töretfelülete

4.6 Fluoridmentes takarósó alkalmazásának eredményei

A kedvezőbb olvadéktisztaság elérése érdekében az olvasztókemence pihentető térrészában fedősó alkalmazásával próbáltam csökkenteni az emelt hőmérséklettel járó gázfelvételt és oxidképződési folyamatot. A sókeverék felhasználási javaslata szerint a sót egyenletesen eloszlattam az olvadékfürdő felületén, majd 30 percig pihentettem az olvadékot. Az olvadékfelszín gondos leszalakolását követően történt a csapolás, háromszor egymást követően. A mérési folyamat során vett K-mold minták törete az 5. ábrán látható, az eredményeket pedig a 13. táblázat foglalja össze.



5. ábra A TBG minták (bal oszlop) és a TKG minták (jobb oszlop) töretfelülete a takarósóval történő olvasztás után

13. táblázat 770°C-on hőn tartott olvadék oldott gáztartalma és tisztasági értékei, fedőso alkalmazása mellett

Mintavételi hely	K-mold [K]
TBG	0,88
TKG	2,46

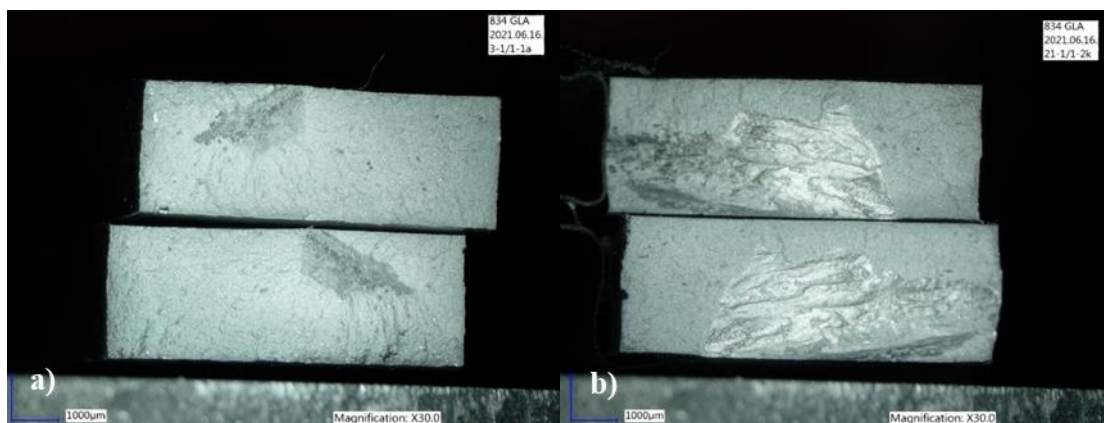
A TBG tiszta besorolásba esnek, azonban a TKG mintákban több, kisebb méretű zárvány volt jelen a töretfelületeken, ezáltal a szennyezett besorolásba tartoznak. A takarósoval elért eredmények azt mutatják, hogy az olvadékban lévő zárványok a pihentetés ideje alatt nem tudnak az olvadékfelszínre felúszni és a salakolást követően eltávozni, ezért azok eltávolítására csak további olvadéktisztító eljárással van lehetőség.

4.7 Ötvözés technológiai pontjának meghatározása

A fentiekben ismertetett hatások miatt megvizsgáltam az ötvözők adagolási pontjának megváltoztatását, hogy megállapíthassam, történik-e érdemi változás a mechanikai tulajdonságokat, illetve az olvadék tisztaságát illetően. Mind a magnéziumot, mind a stronciumot a külső gáztalanítás befejeztével adagoltam a tégelybe, majd az olvadék homogenizációjára alacsony (150 rpm) fordulatszámú keverést alkalmaztam 20 másodpercig. A sűrűség- és K-mold tesztek eredményeit illetően nem tapasztaltam változást a korábbi mérési eredményekhez képest, azonban az ötvények mechanikai tulajdonságai jelentős mértékben romlottak (14. táblázat) A szakítópálcák töreteinek vizsgálatakor nagy kiterjedésű oxidhártyák voltak láthatóak a vizsgált felületeken, melyek a 6.a és 6.b ábrán láthatóak. A magnézium előötvözet adagolása során merülőharang alkalmazására nem volt lehetőség, így a részben oxidálódott előötvözetből származó oxidhártyák az olvadékba keveredtek.

14. táblázat Ötvözési pont megváltoztatása után elért mechanikai tulajdonságok öntött és megeresztett állapotban

Állapot	Folyáshatár [MPa]	Szakítószilárdság [MPa]	Nyúlás [%]
F	120,64±12	208,42±40	3,93±2%
T5	171,80±26	247,58±25	2,92±2



6. ábra A szakítópálcák töretfelületén megjelenő oxid-hártyák optikai mikroszkóppal készített képe, 30X nagyításban

4.8 A hőntartási hőmérséklet hatása az oldott gáztartalomra és a tisztaságra

A 730 °C-ra csökkentett hőmérsékleten történő vizsgálat elvégeztével arra számítottam, hogy az olvadék oldott gáztartalma alacsonyabb lesz, a K-mold teszt értékei pedig megfelelőek, külső gáztalanítás után is.

15. táblázat 730°C-on hőn tartott olvadék oldott gáztartalma és tisztasági mutatói

Mintavételi hely	Sűrűség-index [DI%]	K-mold [K]
TBG	7,86	0,45
TKG	1,71	0,062
HT	3,36	-

A hőmérséklet csökkentése egyértelműen kedvező változásokat eredményezett az olvadék metallurgiai állapotára vonatkozóan (15. táblázat), amellyel igazolható, hogy az öntési hőmérséklet meghatározása rendkívül fontos, hiszen az olvadék túlhevítésének mértéke jelentősen rontja az olvadék tisztaságát (7. ábra).



7. ábra A töretfelületek tisztasága az olvasztási hőmérséklet függvénye

4.9 Különböző mennyiségű magnézium adagolásának eredményei

Az egyes próbaöntések során különböző magnéziumtartalom elérése volt a célkitűzésem, melyektől a növekedő magnézium mennyiség függvényében a mechanikai tulajdonságok javulását vártam (16. táblázat).

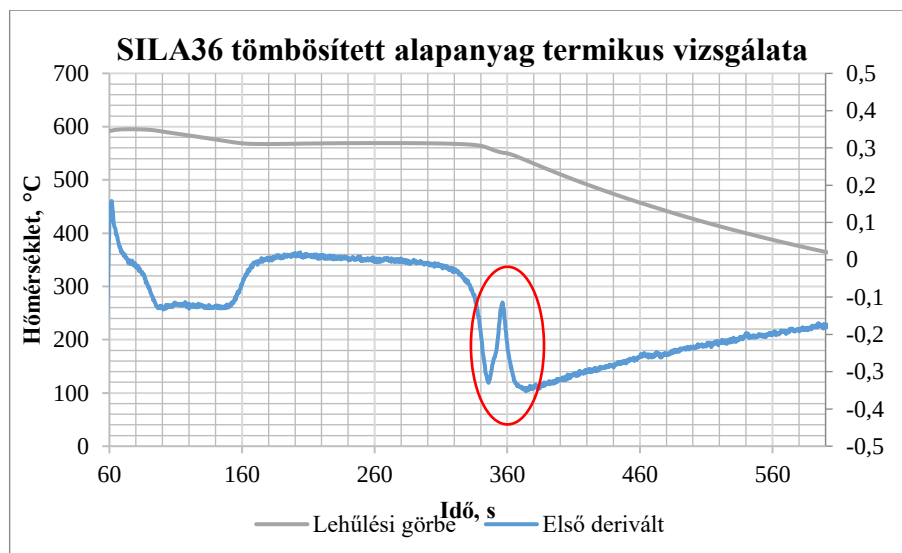
16. táblázat

Mg mennyisége	Folyáshatár [MPa]	Szakítószilárdság [MPa]	Nyúlás [%]
0,30	115,88±1,86	230,39±6,71	6,74±0,62
0,35	112,96±4,14	232,56±9,22	7,77±1,47
0,40	122,68±3,12	241,51±5,56	6,86±1,21

A szakítóvizsgálatok eredményeit összefoglalva látható, hogy a technológia során meghatározott tartományban, a 0,1% Mg tartalom változása szignifikáns eredményt nem okoz. A mechanikai tulajdonságok romlása így elsősorban az olvadék metallurgiai állapotára és a benne lévő egyéb szennyező fázisoknak a szövetelemre gyakorolt negatív hatásával magyarázhatóak.

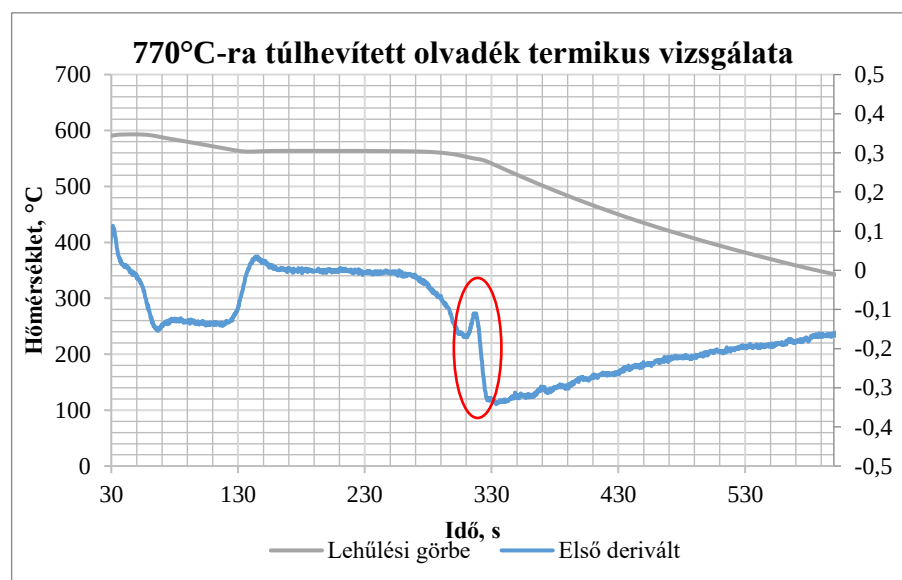
4.10 Termikus analízis eredményei

A termikus analízis elsődleges célja a lehűlés során bekövetkező fázisátalakulások meghatározása volt, különös tekintettel a magnéziumra vonatkozóan. A magnézium referencia értékének, illetve a jellemző görbe meghatározásához mintát vettem a beszállítótól származó eredeti, 0,24% Mg tartalmú Silafont36 öntészeti ötvözet alapanyagából. Az analízis elvégzése céljából indukciós kemencében megolvasztottam a tömbből származó mintát. A vizsgálat során rögzített lehűlési görbét a 8. ábra mutatja.



8. ábra A tömbösített alapanyagból vételezett minta lehülési görbéje

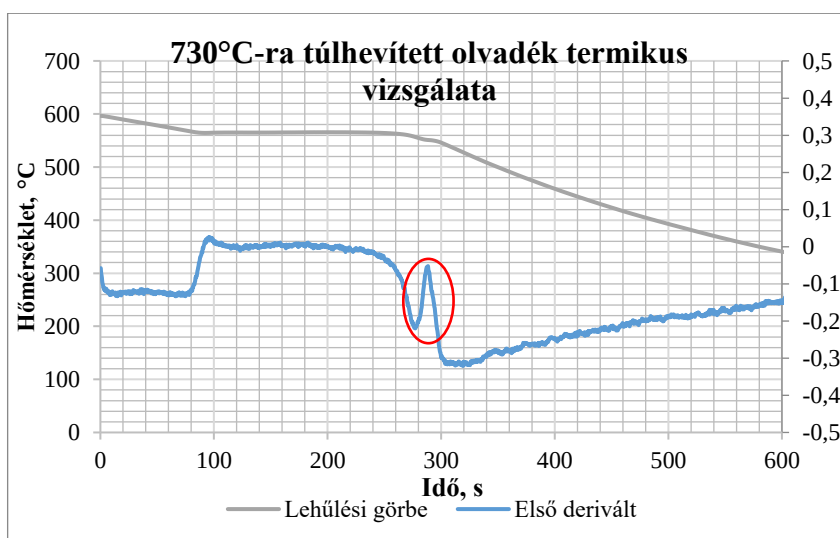
A 9. ábra a 770°C-on olvasztott ötvözetből vett minta lehülési görbáját ábrázolja. A magnézium tartalmú fázisok kiválását kísérő látenshő felszabadulása a derivált görbén lényegesen kisebb csúcsot eredményez, mint a referencia tömb esetén, ahol 0,24% Mg tartalma volt az olvadéknak. A kémiai összetétel elemzés alapján nagyobb látenshő felszabadulással járó reakcióra kellene számítani, abban az esetben, ha az olvadékban oldott állapotban van jelen a magnézium.



9. ábra 770°C-s olvadékból vett minta lehülési görbéje

A termikus elemzés alátámasztja a magasabb olvadékhőmérséklet kedvezőtlen hatását, ugyanis az oxidos formában lévő magnézium nem okoz a kristályosodás során vegyületképződésből eredő látenshő felszabadulást, így az ötvözet mechanikai tulajdonságaira

sem lesz hatással a hőkezelési folyamat, amely a magnézium kiválásokat kívánja visszaoldani, majd a megeresztés során diszpergált állapotban kiválasztani. A 10. ábra a 730°C-on olvasztott ötvözetből vett minta lehülési görbét ábrázolja, melynek magnézium koncentrációja az olvasztási periódus végére 0,3081% volt. Az alacsonyabb hőtartási hőmérséklet az ötvözők kedvezőbb hasznosulását eredményezi, mivel csökken a leégési veszteség mértéke. A termikus analízis alátámasztja az alacsonyabb olvadáshőmérséklet kedvező hatását, mert a magnézium tartalmú fázisok kiválását kísérő látenshő felszabadulása ez esetben jóval magasabb csúcsot eredményezett.



10. ábra 730°C-s olvadékból vett minta lehülési görbéje

4.11 A mechanikai tulajdonságok vizsgálatának eredményei

Az öntött állapotban elért mechanikai tulajdonságok csak részben felelnek meg a vevői elvárásoknak, ezért a darabokon mesterséges öregbítést alkalmaztunk 1 órán át 200°C-on. Hőkezelés után a folyáshatár és szakítószilárdság releváns mértékben javul, azonban az öntött állapothoz képest a nyúlás jelentős mértékben romlik.

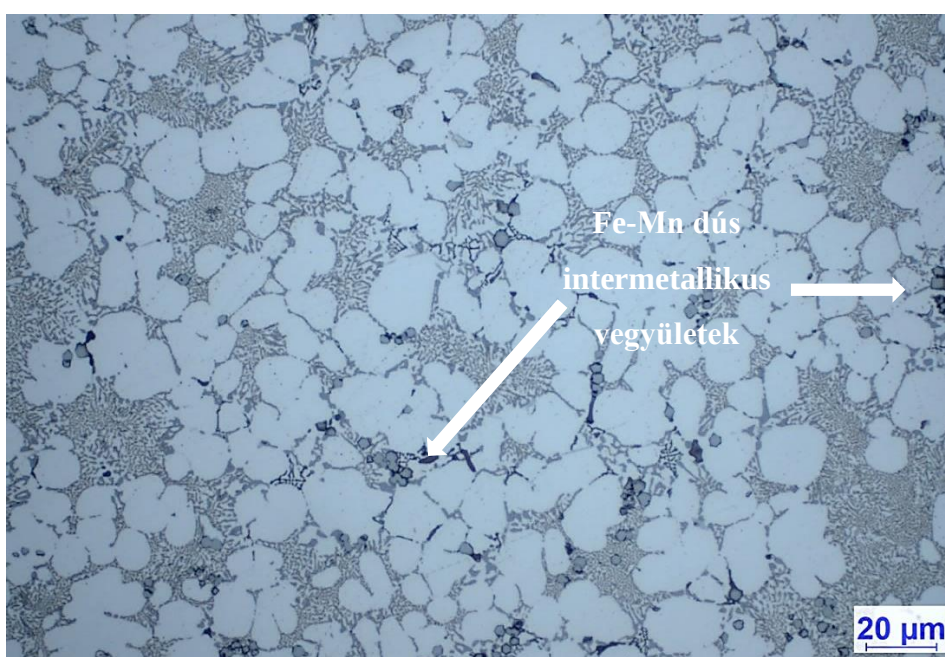
Különböző hőmérsékletek és időintervallumok alkalmazásával megvizsgáltam, hogy milyen változások következnek be a mechanikai tulajdonságokban, melyeket a 17. táblázat foglal össze. Megállapítható, hogy a 30 perces, 250°C-on történő megeresztéssel nyúlás szempontjából kedvezőbb érték érhető el, mint a standard, 1h 200°C-os eljárás esetén. A szakítószilárdság és a folyáshatár értéke mindkét hőkezelési eljárás során hasonló átlageredményeket hozott. Az elmaradó mechanikai tulajdonságok megértése céljából további szövetszerkezeti vizsgálatokat végeztem el.

17. táblázat A Motorlager adapter esetében elért eredmények

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
F állapot	117,31 $\pm$ 3,82	235,21 $\pm$ 10,65	7,06 $\pm$ 1,25
1h 200°C	179,99 $\pm$ 2,00	248,22 $\pm$ 16,64	2,80 $\pm$ 0,71
30 min 250°C	169,10 $\pm$ 8,99	245,78 $\pm$ 8,47	4,68 $\pm$ 1,14

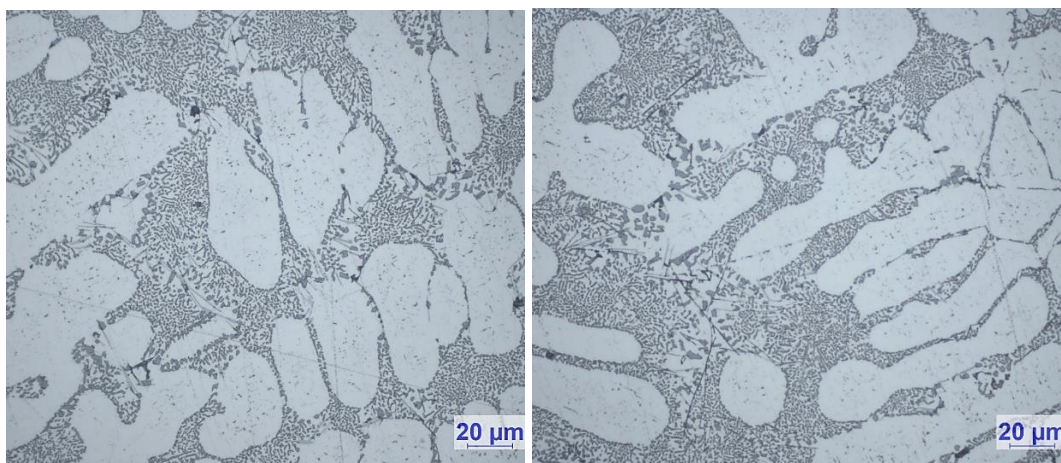
4.12 Szövetszerkezet vizsgálatainak eredményei

A szövetszerkezeten jól látható, hogy az α -Al dendritok között kristályosodott szilícium eutektikum – részben a stronciummal való módosításnak köszönhetően, részben a nyomásos öntéstechnika sajátosságainak köszönhetően – finom eloszlású, lamellás szerkezetű. Az alapmátrix jellegzetes fázisaitól eltérő, sötétszürke színű, szögletes vagy poligon morfológiájú kiválások észlelhetők. (11.ábra).



11. ábra MLA öntvény szövetszerkezetéről készített optikai mikroszkópos felvétel 250X nagyításban

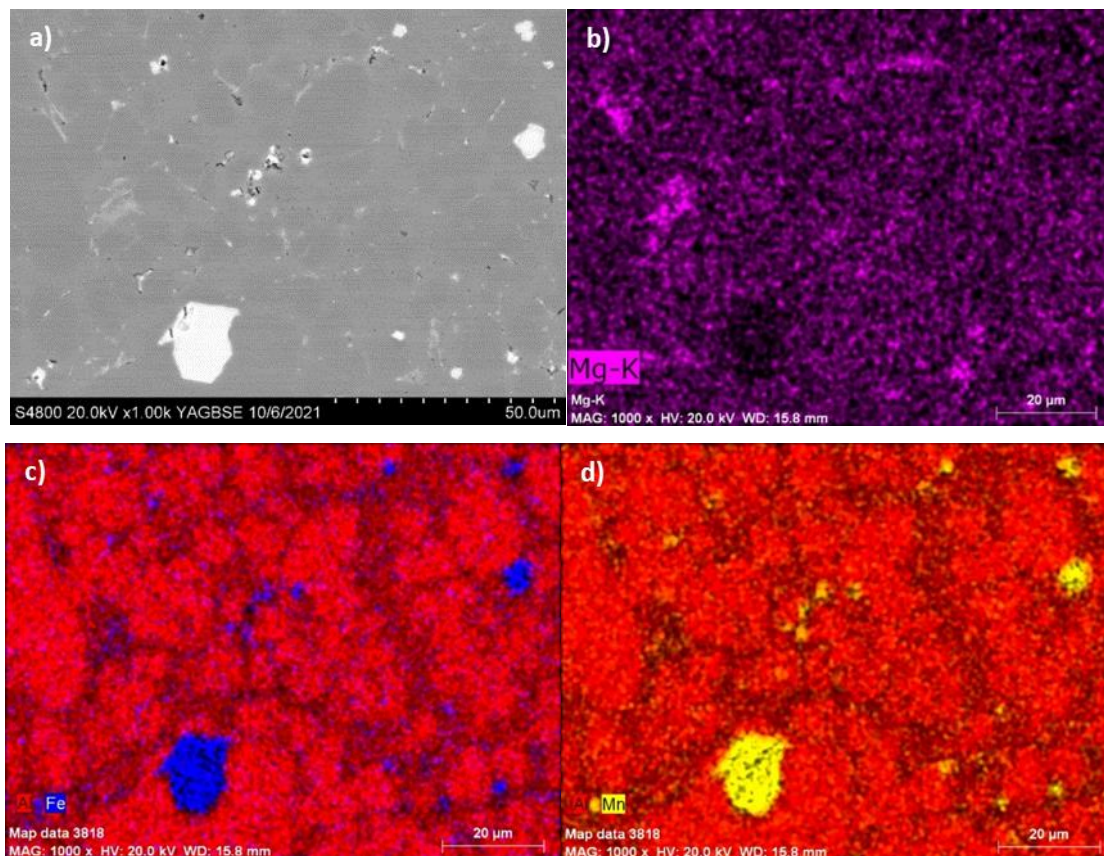
A vegyületfázisok vélhetően az olvasztási technológia során jelennek meg az olvadékban, annak metallurgiai állapotából következő vegyületképződési reakciók során, hiszen a kiindulási alapanyagban nincs jelentős mennyiségű vas (12. ábra), így a képződő vegyületfázisok megjelentése nem indokolt a tömb kémiai összetétele alapján.



12. ábra Tömbösített alapanyagból vett minta szövetszerkezete 250X nagyításban

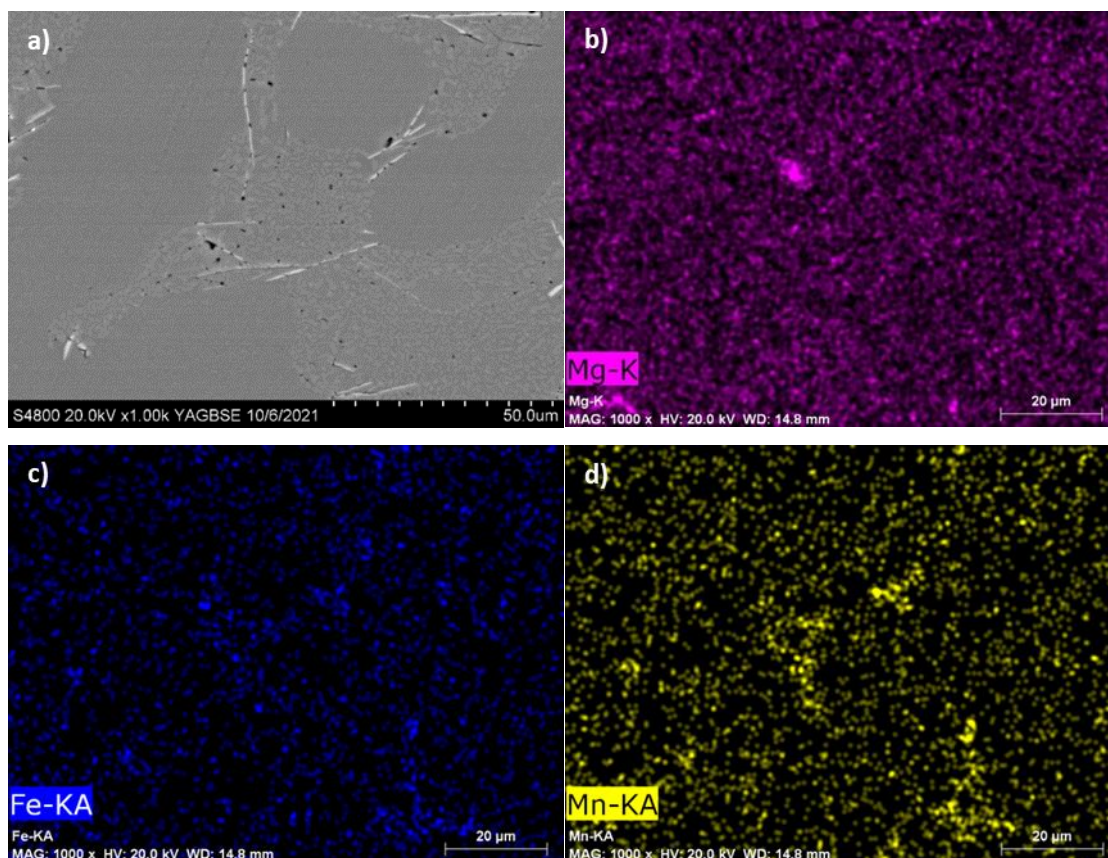
4.13 A pásztázó elektronmikroszkóp vizsgálat eredményei

Az öntvények szövetszerkezetében megfigyelt vegyületfázisokat felépítő elemek meghatározására energiadiszperzív spektrometriát alkalmaztam. A képen látható világosabb területek nagyobb rendszámú elemeket jelentenek. Az energiadiszperzív szondával készített elemtérképeket a 13. ábra mutatja be, amelyek alátámasztják a szakirodalomban is megtalált poligon alakú Fe-Mn vegyületeket. A vasban dús fázisok gyakorlatilag nem tartalmaznak magnéziumot.



13. ábra A a) szövet, b) Mg, c) Fe és d) Mn eloszlása 1000X nagyításban

A vegyületek keletkezési és származási helyének tisztázása érdekében megvizsgáltam az eredeti Silafont36 ötvözet alapanyagból vett mintát, melynek felvételét 14. ábra mutatja. A fáziselemek között nem található nagy kiterjedésű Fe és Mn vegyület.



14. ábra A a) szövet b) Mg, c) Fe és d) Mn eloszlása SEM felvételen 1000X nagyításban az eredeti Silafont36 alapanyagban

A mechanikai tulajdonságok szignifikáns csökkenése az intermetallikus fázisok ötvözetre gyakorolt kedvezőtlen hatásával magyarázható. Az üzemi technológiai folyamat során potenciális szennyezőforrást jelent a csapolás előtt használt 230D (EN AC-44300) ötvözet, amely 0,45-09% közötti vasat és max.0,55% mangánt tartalmaz. A magas vas és mangán tartalom ezekben az ötvözetekben poligon alakú kiválásokat hoz létre. Az olvasztókemence ötvözetváltása és a hőtartási térrész kiürítése és tisztítása után visszamaradt szennyezők könnyen eredményezhetnek minőségromlást a Silafont36 típusú ötvözet számára, amelyek Fe-Mn-ban dús intermetallikus fázisokban jelennek meg, és a hőkezelési eljárások nem nyújtanak megoldást a problémára.

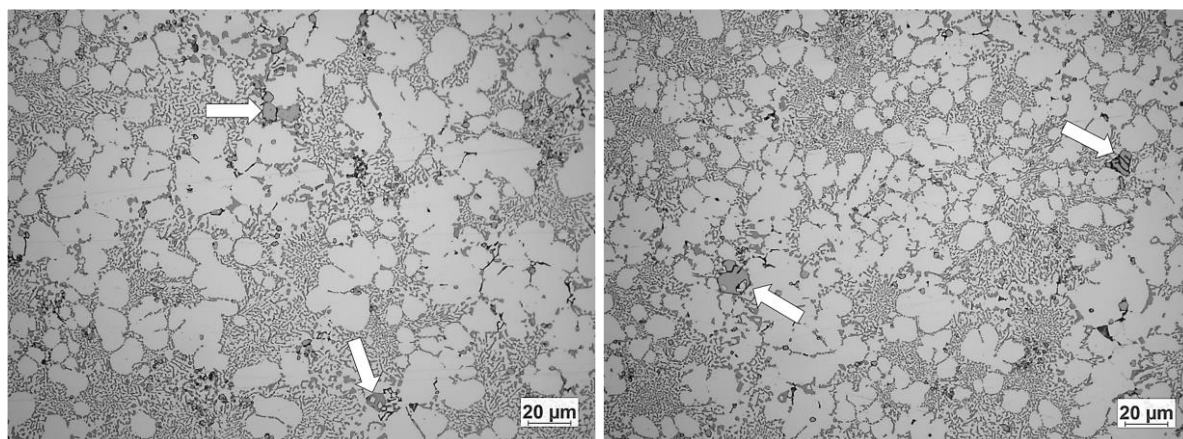
5. Kísérleti eljárás bemutatása és azok eredményei II.

A fentebb ismertetett megállapítások és kísérleti eredmények szerint, a Silafont36 öntészeti ötvözet különösen érzékeny a vasas-mangános vegyületképzésre, kiváltképp más öntészeti ötvözzel való találkozásból eredő, szennyezőelemek átöröklődése lévén. Annak érdekében, hogy ezen intermetallikus vegyületfázisok kialakulását megelőzzem, a lentebb tárgyalt, kísérleti öntési folyamatom számos gondos előkészületi munkafázis előzte meg.

5.1 Kísérleti olvasztási technológia tervezése

Ahhoz, hogy a más ötvözetek vas és mangántartalmából eredő vegyületképződést megelőzzem, a saját, már intermetallikus vegyületfázis csírákkal bizonyítottan szennyezett visszatérő hulladékunkat nem hasznosítottuk újra az olvasztási eljárás során. Ehelyett kizárólag tömbösített alapanyag került felhasználásra, így 100% primer, 0% visszatérő alapanyag arányban került a kísérleti olvadék előállításra egy előzetesen lesalakolt és falazattisztító sóval kezelt, korábbiakban is alkalmazott Striko Westofen kemencében. Fontos kiemelni, hogy a kísérlet ideje alatt, az öntés során keletkezett hulladék sem került visszaolvasztásra.

A korábban vizsgált öntvényeinkben olyan bizonyítottan Fe-Mn összetételű vegyületfázisokat észleltem (15.ábra) a szövetszerkezetben, melyek képződésének valószínűsége a Silafont36 szigorúan betűrt kémiai összetételéből adódóan minimális, emellett, az iszapfaktor vizsgálata sem teszi lehetővé képződésüket, az alkalmazott olvasztástechnológia mellett.



15. ábra A korábbi öntött szövetszerkezetben jelen lévő, intermetallikus (FeMn) vegyületfázisok

A RAFFMETAL és a HENEKEN beszállítóktól vásárolt tömbösített alapanyagból, minden egyes eltérő adagszámmal ellátott rakatból, véletlenszerű mintavételi módszerrel metallográfiai mintákat készítettem, és Keller reagenssel marattam 10 s-ig.

Az olvasztási technológia a korábbi mérési eredményeim [13] alapján került meghatározásra, mely értelmében 750°C-os olvasztási és 730°C-os hűtési paramétereket alkalmaztam. Az olvadék oldott gáztartalmának csökkentése érdekében nitrogénnel történő öblítést végeztem az olvasztókemence pihentető térrészeiben, 8 l/min térfogatárammal.

A stroncium és magnézium olvasztás során bekövetkező koncentráció csökkenése lévén a stroncium és magnézium koncentráció korrekciójához ez esetben is a már ismertetett előötveteket alkalmaztam. Az ellenőrzési mintavétel itt is megtörtént, spektrokémiai mintákkal.

5.2 Meltec hűtőtó kemence előkészítése

A kísérleti darabok öntése FRECH gyártmányú, 1050 tonna záróerejű, pipettás adagolórendszerrel ellátott, vízszintes hidegkamrás nyomásos öntőgépen történt, melynek celláját a 17. ábra szemlélteti. A hűtőtó kemence kísérleti öntésekhez való előkészítése az olvasztók szakszerű közreműködésével történt. A korábbi öntésből visszamaradt fémeket eltávolították, a salakot pedig lehúzták. Az előkészítési folyamat során falazattisztító készítményt is alkalmaztak a lehető legprecízebb eredmény elérése érdekében (16. ábra).



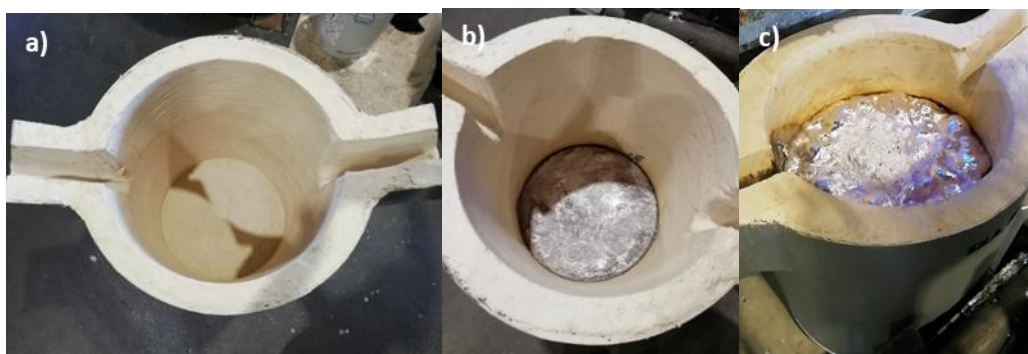
16. ábra A hűtőtó kemencében végzett ötvözetváltás és a tiszta hűtőtó tér



17. ábra A Silafont36 kísérleti öntésére alkalmazott, pipettás mechanizmussal működő FRECH 1050 típusú öntőgép

5.3 Fémhordó tégely előkészítése

A Silafont36 tömbből olvasztott olvadék kiszállítására – az öröklődésre hajlamos szennyezőelemek elkerülése érdekében – a kísérlet során egy teljes mértékben felújított tégelyt alkalmaztam. Egy 270 kg fémolvadék kapacitású fémhordó tégely falazatának kivésésével és újra falazásával kezdtem a kísérletet. A tűzálló falazat megkötése után 2 hétig állni hagytam a tégelyt a beton víztartalmának eltávozása érdekében, majd tégely előmelegítő hiányában, gázégővel, két napon át hevítettem azt. A szárítási folyamat után a tűzálló falazatot Ceramol 258 G2 formaleválasztó anyaggal kezeltem le, majd ezen felületkezelő anyag száradása után már a kísérleti célokra leolvasztott fémmel égettem ki a tégelyt (18.ábra). A tégelyfalazat nedvességtartalma tégely előmelegítő hiányában nem volt képes teljes mértékben eltávozni, ezért a 18. ábrán látható, hogy a tégelybe csapolt fém és a falazat találkozásakor szabadult fel annak nedvességtartalma, mely a későbbi kísérleti eredményeket is befolyásolta, az olvadékba oldódó hidrogén következménye miatt. Az égetés során oxidálódott fémet salakolás után visszatöltötték az olvasztókemence pihentető részébe, majd addig ismételtam a folyamatot, míg a gázfelszabadulási folyamat szemmel láthatóan minimálisra csökkent, azonban a kísérletek elvégzése alatt sem szűnt meg teljesen.



18. ábra A kísérleti tégely tűzálló falazatának kezelése formaleválasztó anyaggal (a) és a maradék nedvességtartalom eltávolítása (b;c) olvasztott fémmel, szakaszos csapolással

5.4 Olvadéktisztítási és minősítési eljárások

A fémhordó tégelybe történő csapolás után FOSECO Rotostativ MTS 1500 rotoros olvadéktisztító berendezéssel végeztem különböző kísérleteket, melyen a pontosabb kísérleti eredmények elérése érdekében teljesen új hullámterelő és rotorszettet szereltem fel. A stronciumot a kezelés megkezdése előtt a tégelybe adagoltam. A gáztalanítás kísérleti paramétereit a 18.-23. táblázatok foglalják össze.

Az olvadéktisztítási folyamat megkezdése előtt, illetve a tisztítási folyamat végbemenetele után történt a mintavételezés mind sűrűség-index, mind zárványtartalom vizsgálatra. A DI% meghatározását a korábban ismertetett típusú berendezésekkel végeztem.

18. táblázat Kísérlet I (továbbiakban K1) olvadéktisztítás paramétereit

Előkeverés, rotorfej öblítés	10 s
Vortex létrehozás	15 s
Sóadagolás ideje	15 s
Reakcióidő	15 s
Gáztalanítási idő	88 s
Fordulatszám	380 rpm
Öblítőgáz (N₂)	18 l/min

19. táblázat Kísérlet I* (továbbiakban K1*) olvadéktisztítás paramétereit

Előkeverés, rotorfej öblítés	10 s
Vortex létrehozás	15 s
Sóadagolás ideje	0 s
Reakcióidő	15 s
Gáztalanítási idő	88 s
Fordulatszám	380 rpm
Öblítőgáz (N₂)	18 l/min

20. táblázat Kísérlet2 (továbbiakban K2) olvadéktisztítás paraméterei

Előkeverés, rotorfej öblítés	10 s
Vortex létrehozás	15 s
Sóadagolás ideje	2 s
Reakcióidő	15 s
Gáztalanítási idő	108 s
Fordulatszám	380 rpm
Öblítőgáz (N₂)	18 l/min

21. táblázat Kísérlet2* (továbbiakban K2*) olvadéktisztítás paraméterei

Előkeverés, rotorfej öblítés	10 s
Vortex létrehozás	15 s
Sóadagolás ideje	0 s
Reakcióidő	15 s
Gáztalanítási idő	108 s
Fordulatszám	380 rpm
Öblítőgáz (N₂)	18 l/min

22. táblázat Kísérlet3 (továbbiakban K3) olvadéktisztítás paraméterei

Előkeverés, rotorfej öblítés	10 s
Vortex létrehozás	15 s
Sóadagolás ideje	2 s
Reakcióidő	15 s
Gáztalanítási idő	138 s
Fordulatszám	380 rpm
Öblítőgáz (N₂)	18 l/min

23. táblázat Kísérlet3* (továbbiakban K3*) olvadéktisztítás paraméterei

Előkeverés, rotorfej öblítés	10 s
Vortex létrehozás	15 s
Sóadagolás ideje	0 s
Reakcióidő	15 s
Gáztalanítási idő	138 s
Fordulatszám	380 rpm
Öblítőgáz (N₂)	18 l/min

5.5 Öntött és hőkezelt szövetszerkezet ellenőrzése

A kísérleti olvadékból öntött termékekből mintát vettem szövetszerkezetre, és a már korábban ismertetett előkészítési eljárás során megvizsgáltam azokat optikai mikroszkóp segítségével. A darabokat ezek után megvizsgáltam a jelenlegi technológiai folyamat előírás

szerint meghatározott T5-ös hőkezelés után, majd ezen felül, T6-os hőkezeléssel végeztem kísérleteket, különböző paraméterekkel. A 24-25.táblázatban az egyes hőkezelési eljárások paraméterei láthatóak, az alkalmazott időintervallumokkal és hűtő közegekkel.

24. táblázat T5-ös hőkezelési eljárás paraméterei

Hőkezelés típusa	Homogenizálás		Edzés közege	Edző közeg hőmérséklete [°C]	Homogenizálás		Hűtés
	Hőmérséklet [°C]	Időtartam [h]			Hőmérséklet [°C]	Időtartam [h]	
T5	-	-	-	-	195	0,5	levegőn

A T5-ös hőkezelési eljárás formából történő eltávolítás után azonnali vízben hűtést, majd megeresztést definiál, levegőn történő hűtéssel. Ezen eljárást Hofmann hőkezelő kemencében végeztem.

25. táblázat T6-os hőkezelési eljárások paraméterei

Hőkezelés típusa	Homogenizálás		Edzés közege	Edző közeg hőmérséklete [°C]	Megeresztés		Hűtés
	Hőmérséklet [°C]	Időtartam [h]			Hőmérséklet [°C]	Időtartam [h]	
T6	490	3	víz	18	165	3	levegőn
T6	520	1	víz	18	160	6	levegőn
T6	520	3	víz	18	160	3	levegőn
T6	520	3	víz	18	160	6	levegőn

A T6-os hőkezelés 490-520°C hőmérséklet tartományon belüli homogenizálást követően vízben történő edzést, majd mesterséges öregítést (megeresztést) definiál, 160-165°C hőmérséklet közben. Az eljárás homogenizáló szakaszát Höker Kft. IKIM 79/1997/KII.31. típusú kemencéjében végeztem. Az edzést követően a megeresztést szintén Höker Kft. gyártmányú, Art-95 L típusú kemencében végeztem. A kemence falazattal történő közvetlen érintkezésétől, és ennek következményeképp jelentkező lokális túlmelegedést megelőzve acélbetétekre helyeztem a darabokat. Az edzés során alkalmazott hűtő közeg hőmérsékletét folyamatos ellenőrzés alatt tartottam K-típusú thermoelemmel ellátott YCT mérőműszer segítségével, szükség esetén hőmérséklet kiegyenlítést végeztem.

5.6 Mechanikai tulajdonságok tesztelése

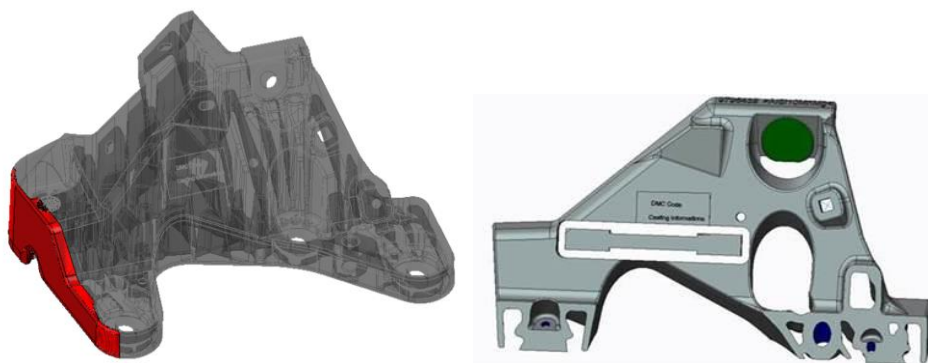
A szakítóvizsgálatokat INSTRON TM-30 berendezéssel, ISO 6892-1: 2019 szabvány, A method szerint végeztem 8 mm széles, 3 mm vastag, szabványos hasáb alakú próbatestek alkalmazásával (20. ábra). A próbatesteket a forgácsoló üzemrészlegen munkáltattam ki

öntvényeinkből, a vevők által meghatározott öntvényrészekből, melyeket a 19. ábra szemléltet. Az öntvény oldalából levágott, SA1 (Sample area 1=1-es mintavételi terület) és SA2 az öntvény homlokfelületéből levágott (2-es mintavételi terület) öntvénydarabokból kimunkált területekre a vevő ezúttal különböző mechanikai tulajdonságok teljesülését várja el. Ezekre a mintavételi területekre elvárt mechanikai tulajdonságokat, öntött állapotra vonatkozóan mutatja be a 26. táblázat.

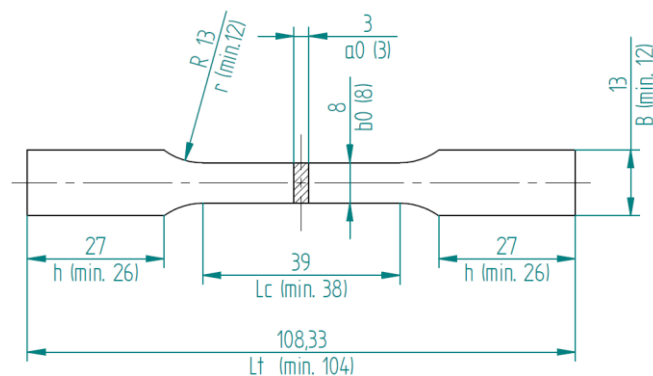
Korábban mindkét mintavételi területre azonos mechanikai tulajdonságot definiált a vevő, melyeket öntött állapotban nem sikerült elérni. Ebből adódóan különböző paraméterekkel történő T5-ös hőkezelési eljárásokat próbáltunk ki, és a legeredményesebb (195°C, 45min) eljárást állandósítottuk a technológiai folyamatban. Ám a későbbiek folyamán szigorított a vevő az elvárásokon, mely szerint (jelenleg) eltérő mechanikai tulajdonságoknak való megfelelést szabott ki az egyes területekre. A T6-os hőkezelési eljárások lehetőségeit ezen okból kifolyólag, és az eredmények függvényében tartottam indokoltnak.

26. táblázat Az előírt követelmények az egyes mintavételi helyek szerint

Mintavételi hely	Folyáshatár [MPa]	Szakítószilárdság [MPa]	Nyúlás [%]
SA1	143	265	min. 5
SA2	141	261	min. 5



19. ábra SA1 mintavételi hely az öntvény oldalfalából (balra) és SA2 mintavételi hely az öntvény homlokfelületéből



20. ábra Az öntvényből kimunkált szabványos próbatest méretei

A darabokat mind öntött, mind hőkezelt állapotban megvizsgáltam a mechanikai tulajdonságokra nézve. A próbatestek töretfelületeiről optikai mikroszkópos felvételeket is készítettem.

5.7 Olvadékelemzés eredményei

Az olvadéktisztítási eljárás során megvizsgáltam, hogy a tisztítási technológia lerövidítésével továbbra is elérhető-e az oldott gáztartalom mennyiségének 2DI% alatt tartása. Emellett megvizsgáltam az olvasztási technológia során más ötvözeinknél folyamatszínt alkalmazott, Coveral MTS 1524 olvadéktisztító só hatását a Silafont36 ötvözet esetében, kifejezetten a porsalak elősegítése céljából.

Az egyes kísérleti eljárások esetében a *-al nem jelölt esetekben végeztem sózást a tisztítási folyamat során. A BG jelölések az olvasztókemencéből történő csapolás után vett értékeket, a KG jelöléssel ellátott eredmények pedig a rotoros tisztítás után elért eredményeket reprezentálják. Az elért eredményeket a 27. táblázat tartalmazza tételesen.

A K1 kísérlet során látható, hogy a rotoros gáztalanítás elvégzése után az olvadék oldott gáztartalma jelentős mértékben növekedett. Ennek egyértelmű oka a korábban ismertetett, olvadt fémrel történő tégely előmelegítési eljárás. A tégely falazatából származó víz távozásakor keletkezett vízgőz hidrogén tartalma az olvadékban „rekedt”. (Ezt jelen esetben igen fontos kiemelni, ugyanis a szövetek és mechanikai tulajdonságok vizsgálata során jelentős hatással lesz eredményeimre.)

A későbbi kísérletek során a tégely falazata kiszáradt oly mértékben, hogy a BG értékek csökkenő tendenciájából egyértelműen valós értékek állapíthatóak meg. A kísérletek során az oldott gáztartalmat ugyan nem sikerült tartósan 2% alá vinni, viszont az elért értékek 2,5-3,5% között mozogtak, amely mindenképpen bizakodásra ad okot. Olvadéktisztító só alkalmazásakor

minimális oldott gáztartalom csökkenés látható K2-K2* és K3-K3* kísérlet-párok eredményeit nézve.

27. táblázat Az elért sűrűség-index és K-mold értékek az olvadéktisztítási kísérletek során

Kísérlet	DI%		K-mold	
	BG	KG	BG	KG
K1	11,30	15,99	0,43	0,71
K1*	7,82	5,59	0,57	0,45
K2	4,56	3,46	0,60	0,90
K2*	4,31	3,56	0,21	0,10
K3	3,93	2,55	0,39	0,95
K3*	5,38	3,07	0,44	0,35

A K-mold tesztek eredményeit szintén a 27. táblázat szemlélteti. A K1, K2, K3 kísérletek esetében nem alkalmaztam olvadéktisztító sót. Ekkor a K értékek kisebbek, tehát kevesebb zárványt tartalmaztak a vizsgált töretfelületek. Az eredmények alapján elmondható, hogy jelen ötvözet esetében az olvadéktisztító só hatása csak az oldott gáztartalomra bír kedvező hatással, az olvadék zárványtartalmát tekintve viszont kedvezőtlen is lehet. A kísérletek során vizsgált töreket a 21.-22. ábrák mutatják be.



21. ábra Az olvadéktisztító só alkalmazásával vizsgált töretek

A fent bemutatott képek esetében az a) oldalon lévő minták a BG, míg a b) oldalon látható minták a KG után vett minták töretei. Látható, hogy a rotoros gáztalanítás után vett minták töretei szennyezettek, ám az irodalmi besorolás szerint a „C” osztályba esnek, tehát a „bizonyos mértékig” tiszta kategóriába. Ebből kifolyólag a tisztítási folyamat során csak indokolt esetben ajánlanám ezen sókészítmény alkalmazását, pl. erősen szennyezett visszatérő hulladék feldolgozása során.



22. ábra Kizárólag nitrogén öblítéses tisztítási eljárás után vizsgált töretek

A sózás nélkül vett eredmények viszonylag tiszta, homogén töretekkel eredményeztek. A jelen lévő zárványok igen kis méretűek a sózott eredményekhez viszonyítva.

5.8 Kezelőszó hatása a salak fémtartalmára

A rotoros gáztalanítási eljárások után rendszerint nagy fémtartalmú, egybefüggő, oxidokban dús salak képződik, melyben vélhetően az ötvözési eljárás is szerepet játszik, mivel az oxigénhez nagy affinitású elemek olvadékhoz történő hozzáadásáról beszélünk. A kísérletek után képződött, olvadék felszínén megjelenő salakokat a 23.-24. ábrák mutatják be. A képek alapján elmondható, hogy az olvadéktisztító só alkalmazása után a salak felszakadozik, kevésbé egybefüggő réteget képez az olvadék felületén. Azonban, közel sem olyan porszerű, mint más ötvözeteinknél alkalmazott és tapasztalt olvadéktisztítás után. Az eredmények pontos megállapításában a későbbiekben érdemes lenne salak-fémtartalom mérést végezni.



23. ábra Egybefüggő salak és oxidos hárták az olvadék felületén

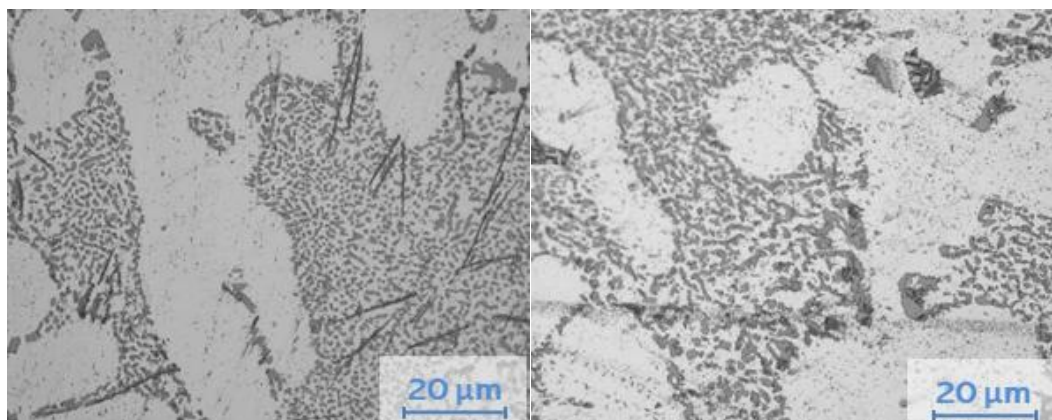


24. ábra Sózással végzett olvadéktisztítási kísérletek után képződött salak

5.9 Szövetszerkezetek eredményei

5.9.1 Tömbösített alapanyag szövetszerkezete

A tömbösített alapanyag szövetszerkezetének vizsgálatakor ezúttal β -típusú, FeMn vegyületek jelenlétét igazoló, jellegzetes tűs vegyületfázisokat detektáltam (25.ábra, bal).

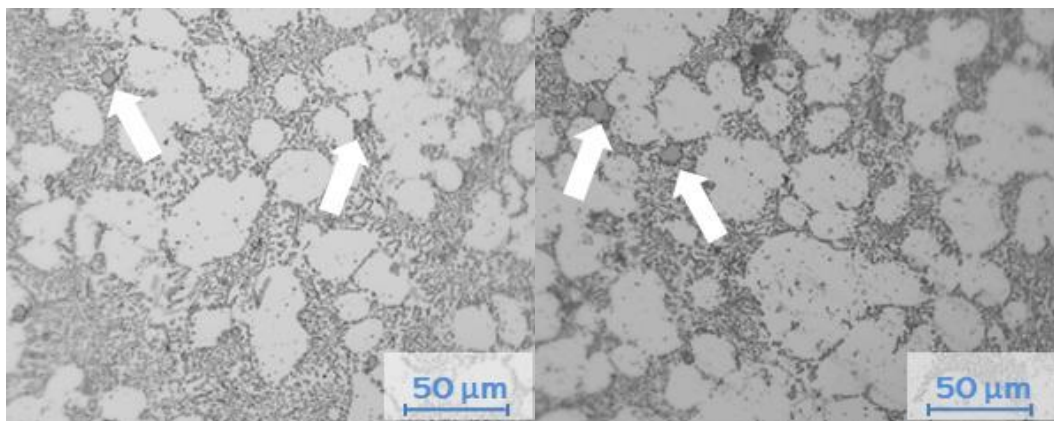


25. ábra Az 1. és a 2. rakat RAFFMETAL tömbökből véletlenszerűen kivett minták szövetszerkezete X20 nagyításban

5.9.2 Öntött szövetszerkezet

A kísérleti olvadékban az α -Al denriték határain egyértelműen felismerhetőek a már β -típusú, sokszög/poligon morfológiával kristályosított intermetallikus vegyületfázisok (26.ábra). Ennek oka az olvadékhoz adagolt Sr előötvözet, hiszen számos kutatás alátámasztja, miszerint a stroncium elősegíti a vasas vegyületek kedvezőbb morfológiával történő kristályosodását, mely a mechanikai tulajdonságok szempontjából releváns, ugyanis nem szakítják meg a szövet folytonosságát, és feszültséggyűjtő mivoltukban akadályozottak. Emellett, az alkalmazott öntészeti technológia sem elhanyagolható jelen esetben a szövetszerkezet kialakulásánál.

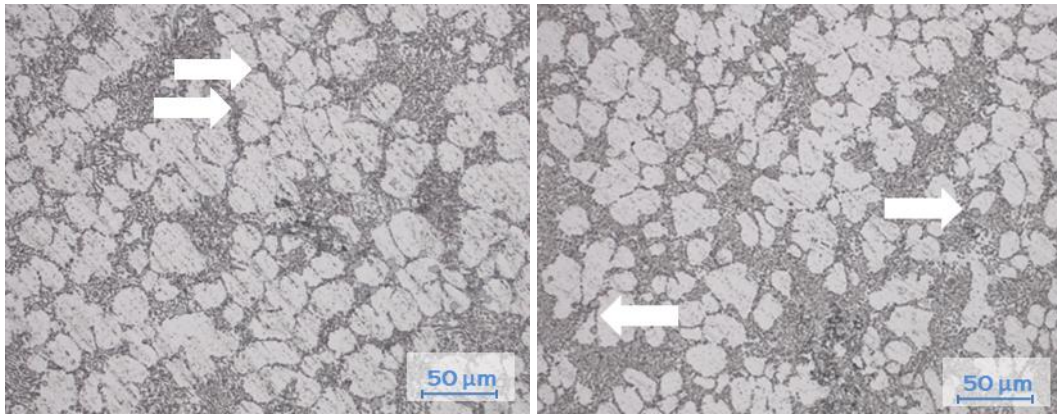
Az alfa fázis esetében megfigyelhetők még apró, tűszúrásokra emlékeztető pontok, melyek az olvadékban nagy mértékben beoldódott hidrogén jelenlétére utal, mely az ötvözet dermedésekor rendre kiválik.



26. ábra Kísérleti olvadékból öntött szövetszerkezetek 100X nagyításban

5.9.3 T5 hőkezeléssel elért szövetszerkezetek

A technológiai eljárásban, folyamatszinten alkalmazott T5 hőkezelések alkalmazása után a szövet (27. ábra) nem sokban különbözik a korábban prezentált öntött szövettől. A vegyületfázisok jelenléte ez esetben is megfigyelhető a primér Al fázishatárokon. A korábban vizsgált öntött szöveteknél szögletes, négyzet/téglalap alakú kiválások a Sr alkalmazásából származó, más ötvözőelemekkel alkotott stronciumos vegyületkiválásokra enged következtetni. Ezen vegyületeknek szintén magasabb az olvadáspontja, mint egy öregítéskor alkalmazott hőmérsékletköz, továbbá nagykeménységűek is. Ezek jelenléte nemcsak megmunkálás szempontjából negatív, de szintén feszültséggyűjtő helyekként funkcionálhatnak, visszaoldásuk T5 alkalmazásával nem megoldható.

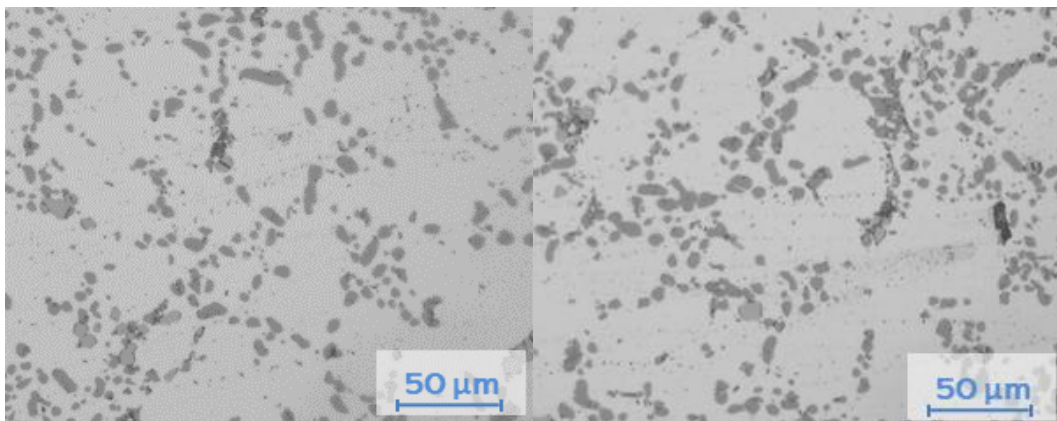


27. ábra Kísérleti olvadékból öntött, T5 utáni szövetszerkezetek 100X nagyításban

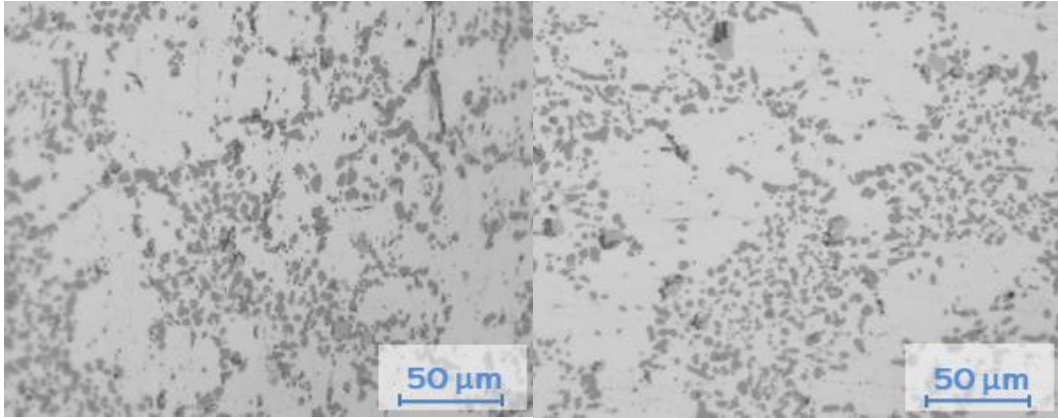
5.9.4 T6 hőkezeléssel elért szövetszerkezetek

T6-os hőkezelési eljárásokkal elért eredményeket szemléltetnek a 28-31. ábrán látható szövetek. A poligon alakú, vas-mangános kiválások jelenléte azok korlátozott visszaoldhatóságuk lévén várható volt a szövetben. Viszont, jelentős változásokról beszélhetünk az egyéb vegyületek jelenlétét vizsgálva. Eloszlásuk a primér Al fázisok mentén homogén, jelentős mértékben gömbösödött, és az eutektikum is homogén eloszlást mutat.

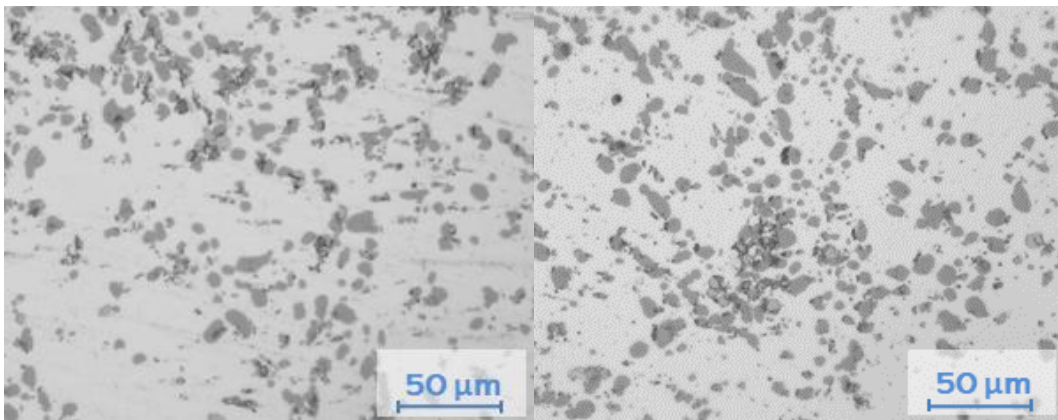
Emellett, a T6-os hőkezelések során kapott szövetszerkezetek közel azonosak a korábban, irodalmi forrásokban látott szövetekkel, ezért mindenképpen javulást vártam a mechanikai tulajdonságok vizsgálati eredményeiben.



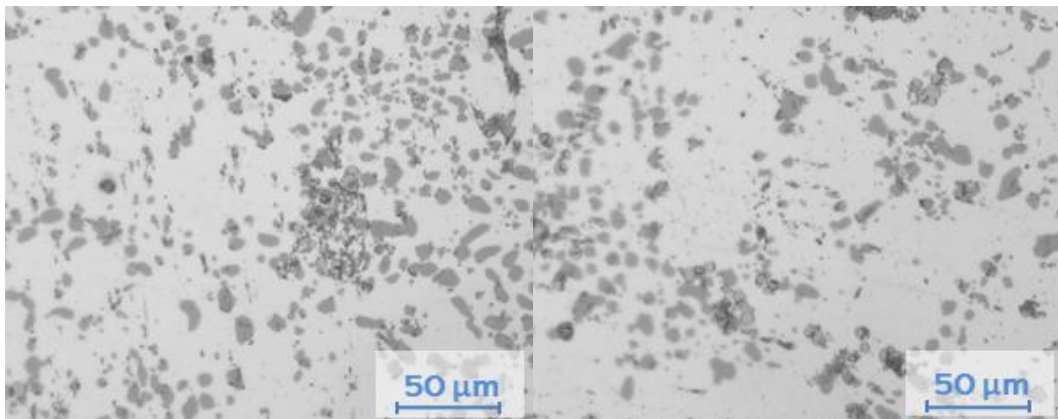
28. ábra 490°C 3h homogenizálással és 165°C 3h megeresztéssel elért szövetszerkezet 100X nagyításban



29. ábra 520°C 1h homogenizálással és 160°C 6h megeresztéssel elért szövetszerkezet 100X nagyításban



30. ábra 520°C 3h homogenizálással és 160°C 3h megeresztéssel elért szövetszerkezet 100X nagyításban



31. ábra 520°C 3h homogenizálással és 160°C 6h megeresztéssel elért szövetszerkezet 100X nagyításban

5.10 Mechanikai tulajdonságok vizsgálati eredményei

5.10.1 Kísérleti olvadékból öntött, T5 hőkezeléssel elért eredmények

A kísérleti olvadékból öntött darabok egy részét öntött, egy részét pedig a technológiai folyamaton végig víve, T5-ös hőkezelési eljárás után vizsgáltam a mechanikai tulajdonságaira

nézve, melyeket a 28. táblázatban foglaltam össze. A folyáshatár és szakító szilárdság érdemben nem változott, a kritériumokat csak megeresztett állapotban érik el. A nyúlás értékei továbbra is csökkenő tendenciát mutatnak megeresztés után, holott öntött állapotban meghaladják az 5%-ot.

28. táblázat Kísérleti olvadékból öntött (F) és T5 állapotú minták mechanikai tulajdonságai

Mintavételi hely	Állapot	Folyáshatár [MPa]	Szakítószilárdság [MPa]	Nyúlás [%]
SA1	F	119,51±3,40	250,36±5,77	6,77±0,43
SA2	F	116,05±1,15	225,34±5,52	5,49±0,86
SA1	T5	152,71±9,95	243,55±18,65	3,28±1,24
SA2	T5	147,30±5,67	240,15±11,27	3,28±0,72

5.10.2 Kísérleti olvadékból öntött, T6 hőkezeléssel elért eredmények

A kísérleti olvadékból öntött darabokon ezúttal T6-os hőkezelési eljárásokat is alkalmaztam, melyekre eddig a cég keretein belül nem volt lehetőségem. A kísérlet során alkalmazott homogenizálási és megeresztési paramétereket a 29. táblázat foglalja össze.

29. táblázat T6-os hőkezelések eredményeinek összefoglalása

Mintavételi hely	Homogenizálás	Megeresztés	Folyáshatár [MPa]	Szakítószilárdság [MPa]	Nyúlás [%]
SA1	490°C; 3h	165°C; 3h	204,91±19,92	265,19±5,00	4,12±2,06
SA2			184,88±29,47	246,12±19,61	3,68±1,49
SA1	520°C; 1h	160°C; 6h	226,80±20,58	292,81±13,07	4,23±2,28
SA2			205,92±17,38	270,91±9,28	3,22±1,25
SA1	520°C; 3h	160°C; 3h	147,00±1,29	223,48±28,09	5,25±4,03
SA2			138,31±0,04	207,04±35,86	4,60±4,10
SA1	520°C; 3h	160°C; 6h	235,74±6,35	276,39±19,94	2,05±1,39
SA2			235,23±3,31	279,91±9,45	2,18±0,66

A nyúlás az előírt értékhez a legközelebb a 3 óráig, 520°C-on homogenizált és 160°C-on, 3 óráig megeresztett darabok esetében volt megfigyelhető. A 490°C-on 3 óráig homogenizált, 165°C-on megeresztett darabok eredményei ugyan elmaradnak az előzőekben ismertetett eredményekhez, ám közel azonos eredményeket mutat az 520°C-on 1 óráig homogenizált, majd 160°C-on megeresztett darabok eredményeivel. Az azonos hőmérsékleten homogenizált, ám 6 óráig, lényegében túlóregített darabok nyúlás szempontjából a legkedvezőtlenebbek. A

folyáshatár és a szakítószilárdság esetében, ahol mindkét mintavételi területre teljesülnek az elvárások, azok az alábbi hőkezelések: 520°C 1 óra homogenizálás, 160°C megeresztés; 520°C 3 óra homogenizálás és 160°C 6 óra megeresztés. Az T5-ös eljáráshoz képesti, százalékban elért eredményeket a T6-os eljárásra nézve a 30. táblázat foglalja össze.

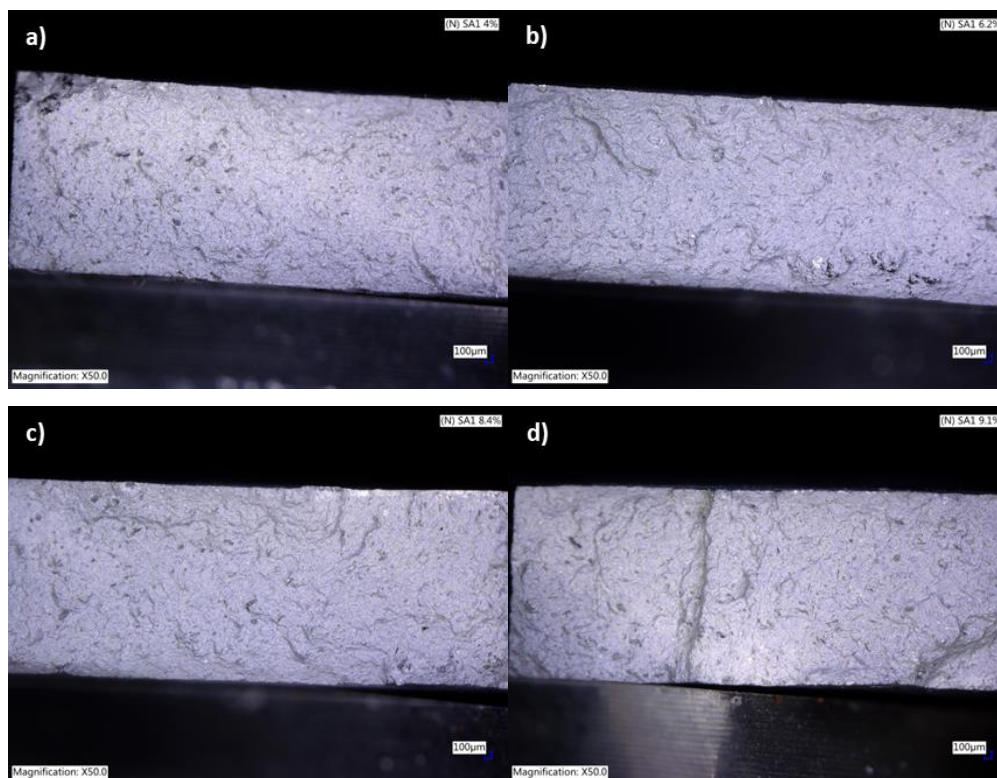
30. táblázat A T6-os hőkezelések eredményei, százalékban számolva

Mintavételi hely	Homogenizálás	Megeresztés	Folyáshatár változása [%]	Szakítószilárdság változása [%]	Nyúlás változása [%]
SA1	490°C; 3h	165°C; 3h	+34,18	+8,89	+25,55
SA2			+25,51	+2,49	+12,18
SA1	520°C; 1h	160°C; 6h	+48,52	+20,23	+29,01
SA2			+39,79	+12,81	-1,95
SA1	520°C; 3h	160°C; 3h	-3,74	-8,24	+59,99
SA2			-6,11	-13,79	+40,22
SA1	520°C; 3h	160°C; 6h	+54,37	+13,48	-37,53
SA2			+59,69	+16,56	-33,70

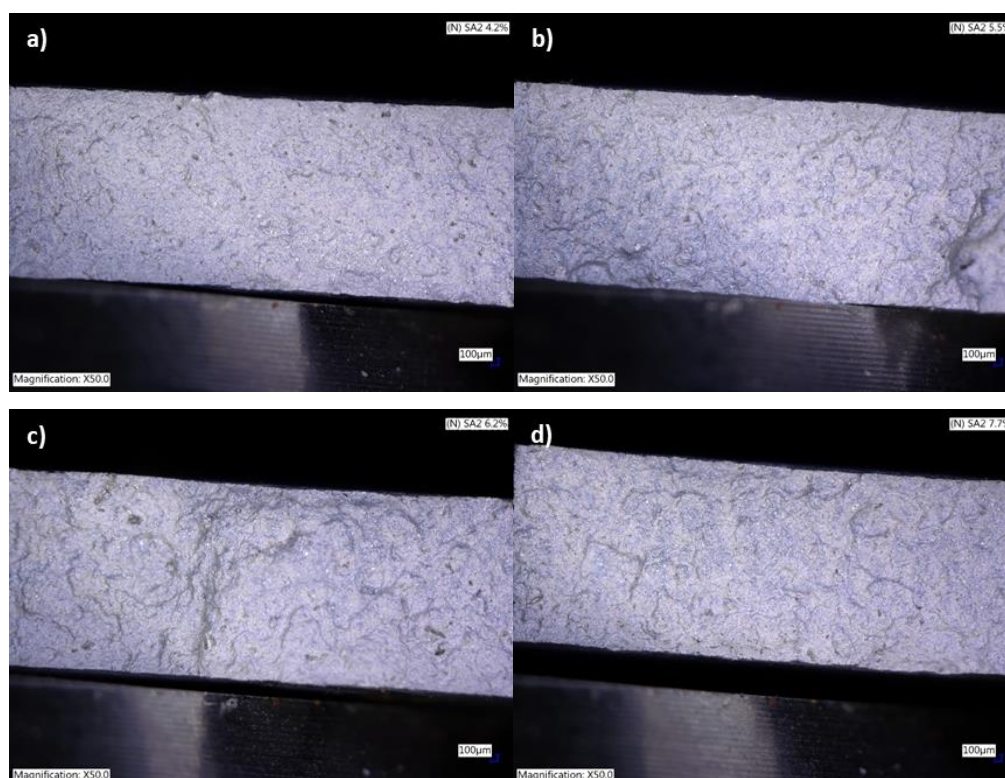
A nyúlások eredményeit figyelembe véve megállapítható, hogy többségében növekedtek az eredmények az általános, T5-ös hőkezelési eljárásokkal szemben. Továbbá, az eredmények kiértékelésekor 5-8%-os nyúlások is megjelentek, ezért Keyence VHX-5000 digitális mikroszkóppal megvizsgáltam a szakító próbatestek töreiteit, a nyúlások függvényében.

Úgy vélem, hogy a kísérleti olvadáék gáztartalma akadályozza a szövet nyúlási tulajdonságait azáltal, hogy a hőkezelési eljárások során ezek az apró gázzárványok kitágulnak, és megszakítják a szövet folytonosságát.

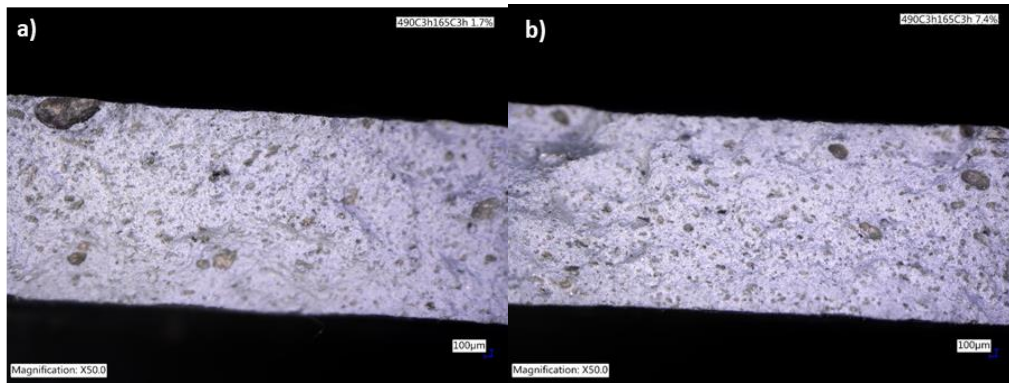
Az öntött állapotú szakítópálcák töreiteit az 32-33.ábrák szemléltetik. Az öntött felületeken jóval kisebb gázzárványok jelenléte deketálható, mint a hőkezelték esetében. A T6 hőkezeléseken átesett darabokból kimunkált próbatestek töreiteit az 34-40. ábra szemlélteti. A hőkezelt töretek esetében elmondható, hogy a nyúlás értékeit jelentős mértékben, negatívan befolyásolta a szövetben is megjeleő, oldott gáz jelenléte, melyek a hőkezelés hőmérsékletén térfogatnövekedést szenvedtek. A töretek és nyúlási értékek mefigyelése során azomban az is látható, hogy amennyiben a gáz és oxidzárványok eloszlása a töret felületén homogén, 4-5%-os (34. ábra b; 35. ábra b; 37. ábra b) és akár 6-7-8%-os nyúlás is elérhető (36. ábra b; 38. ábra b és d).



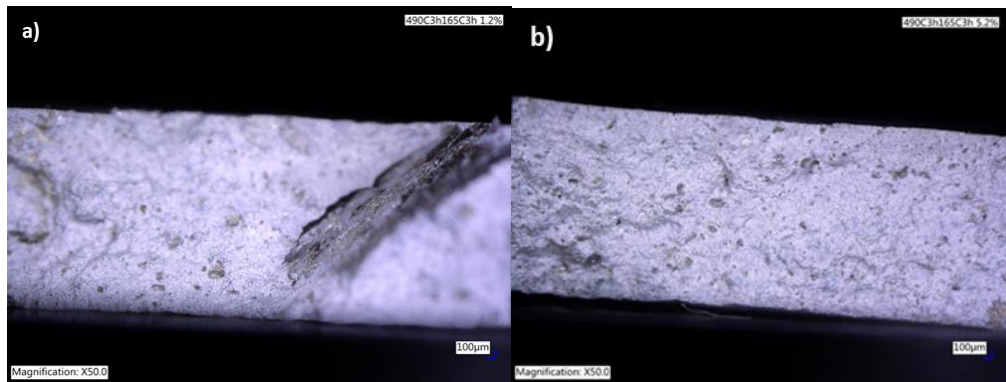
32. ábra Öntött SA1 szakítópálcák töretei a) 4% b) 6,2% c) 8,4% és d) 9,1%-os nyúlással, 50X nagyításban



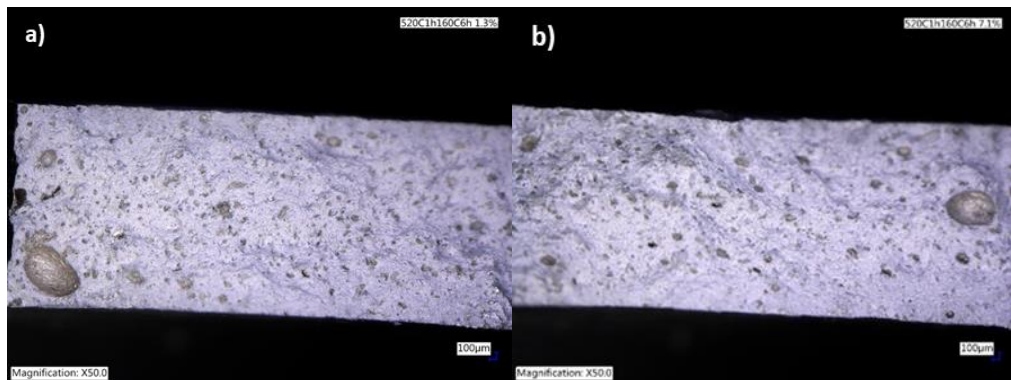
33. ábra Öntött SA2 szakítópálcák töretei a) 4,2% b) 5,5% c) 6,2% és d) 7,7% nyúlással, 50X nagyításban



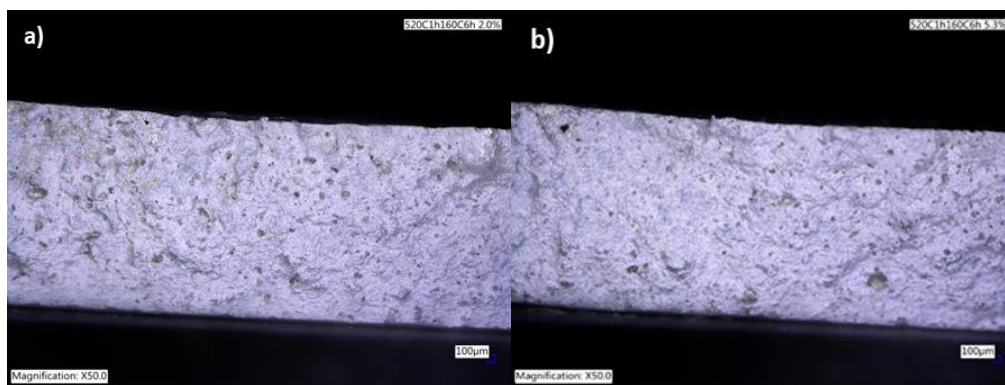
34. ábra 490°C-on homogenizált, 165°C-on megeresztett, SA1 területről származó próbatestek a) 1,2% és b) 7,4-os nyúlással 50X nagyításban



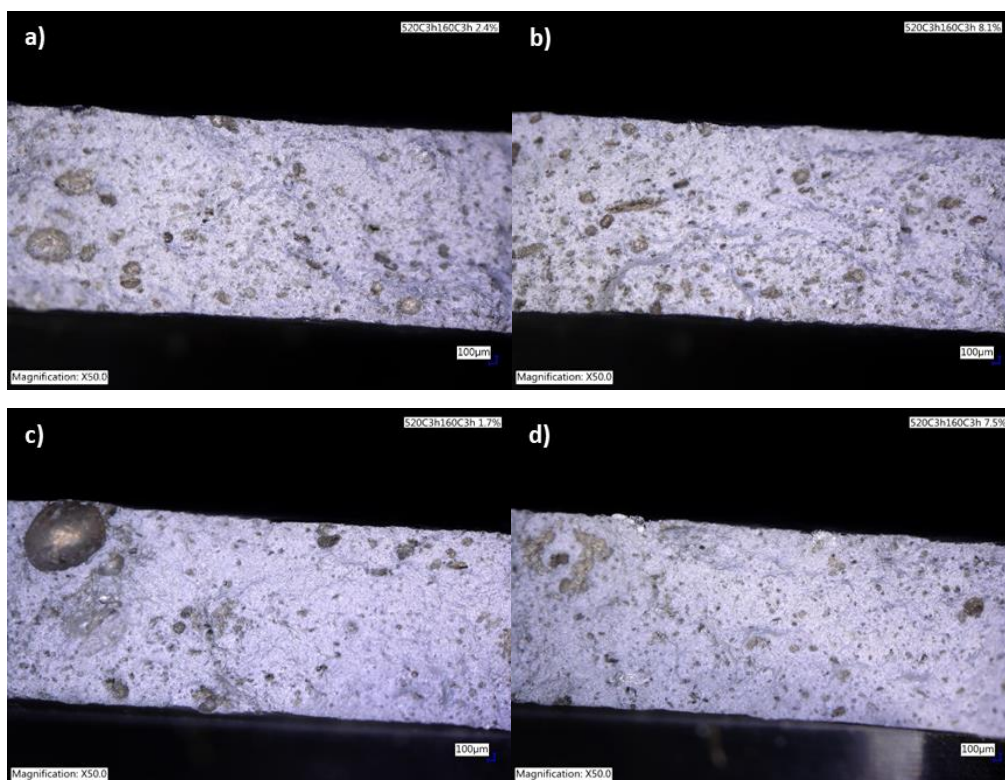
35. ábra 490°C-on homogenizált, 165°C-on megeresztett, SA2 területről származó próbatestek a) 1,2%; b) 5,2%-os nyúlással 50X nagyításban



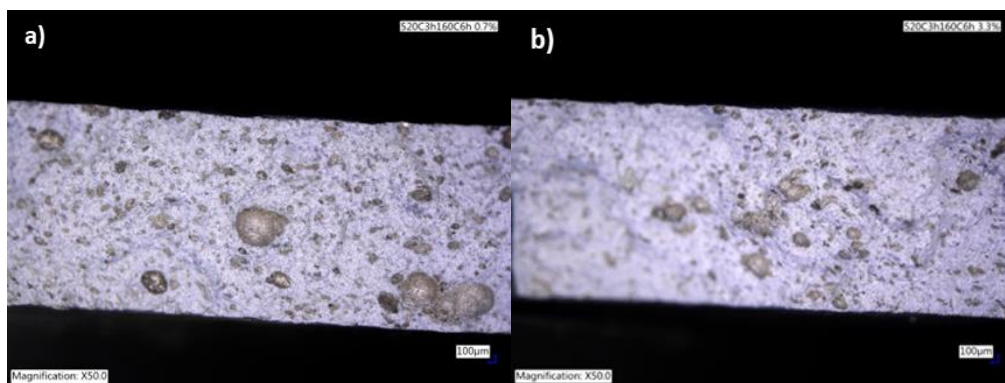
36. ábra 520°C-on (1h) homogenizált, 160°C-on (6h) megeresztett, SA1 területről származó próbatestek a) 1,3%; és b) 7,1%-os nyúlással 50X nagyításban



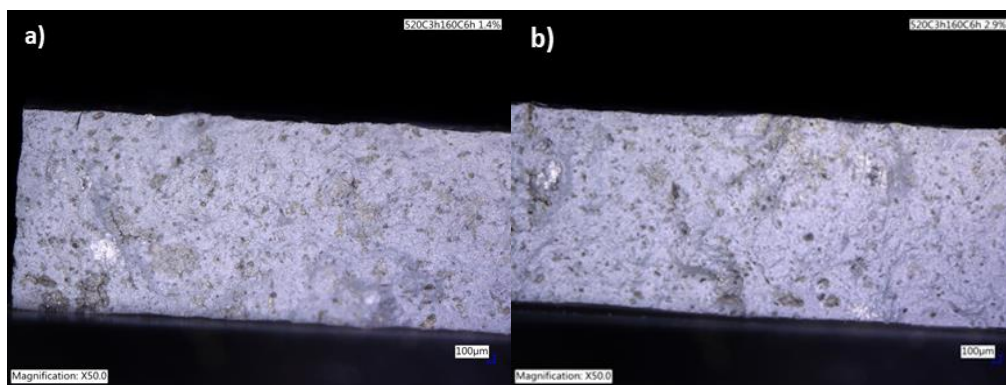
37. ábra 520°C-on (1h) homogenizált, 160°C-on (6h) megeresztett, SA2 területről származó próbatestek a) 2,0% és b) 5,3%-os nyúlással 50X nagyításban



38. ábra 520°C-on (3h) homogenizált, 160°C-on (3h) megeresztett, SA1 próbatestek a) 2,4% b) 8,1% és SA2 próbatestek c) 1,7% d) 7,5%-os nyúlással 50X nagyításban



39. ábra 520°C-on (3h) homogenizált, 160°C-on (6h) megeresztett, SA1 területről származó próbatestek a) 0,7% és b) 3,3%-os nyúlással 50X nagyításban



40. ábra 520°C-on (3h) homogenizált, 160°C-on (6h) megeresztett, SA2 területről származó próbatestek a) 1,4% és b) 2,9%-os nyúlással 50X nagyításban

6. Összefoglalás

A járműipari öntészet területén egyre szigorodó vevői kritériumoknak kell megfelelni mind az olvadékminőség, mind a késztermék tulajdonságait tekintve. Dolgozatom célkitűzése a Silafont36 öntészeti ötvözetből öntött termékek mechanikai tulajdonságait befolyásoló paraméterek vizsgálata volt.

Az ipari gyakorlatban széles körben alkalmazott olvadékelemzési eljárásokkal, sűrűség-index méréssel és K-mold teszt alkalmazásával minősítettem az olvadék tisztaságát. Az olvadék 770°C-ra való túlhevítésének számos káros hatását sikerült igazolni, ugyanis az oldott gáztartalma jelentősen megemelkedett, de a külső gáztalanítási folyamattal elérhetőek az elvart, 2% alatti értékek. Az olvadéktisztítási folyamatot követő K-mold minták töretfelülete rendszeresen komplex zárványokkal volt szennyezett, amely a túlhevítés során létrejövő intenzív oxidációs folyamatokkal magyarázható.

A túlhevítés jelentős hatással volt az oxigénhez nagy affinitású ötvözőelemek (Mg, Sr) kiegészésében is, melyet a fedősó alkalmazása sem akadályozott meg.

Az ötvözők adagolásának megváltoztatása a gáztalanítási periódus végére nem hozott pozitív változást az öntvények mechanikai tulajdonságában, ugyanis az előötvözők adagolása során a felület közelében történő oldódás miatt jelentős mennyiségű oxidzárvány képződött.

A termikus analízis eredményei szintén alátámasztották az olvadék túlhevítésének kedvezőtlen hatásait, melynek következtében az olvadékban oldott magnézium egy része oxidos formában jelent meg, mely megakadályozta szilárdságnövelő tulajdonságának hatását. Az olvadék alacsonyabb hőmérsékleten való hőntartása az oldott gáztartalom releváns mértékű csökkenését eredményezte, és a K-mold tesztek is tiszta töretfelületet eredményeztek, az olvadék külső gáztalanítása után is.

A mechanikai tulajdonságok különböző megeresztési eljárások után sem hozták az elvart eredményeket, ezért szövetszerkezeti vizsgálatokat végeztem. Összehasonlítottam az olvasztás után létrejött öntvény szövetszerkezetét, valamint a beszállítótól származó eredeti Silafont36 ötvözet tömb formájú alapanyagát. Az optikai mikroszkópos és SEM vizsgálatok legfontosabb eredménye a vas-mangán intermetallikus vegyületfázisok detektálása az öntvények szövetszerkezetében. Ezek a vegyületfázisok kémiaiilag igen stabilak, ezért az öntvények megeresztésekor alkalmazott hőmérsékleten nem tudnak elbomlani, az alaksajátosságuk és rideg fázisként való viselkedésük a mechanikai tulajdonságokat kedvezőtlen irányba tolják el. A vegyületek vélhetően az olvasztási technológia során kerültek az olvadékba, hiszen az alapanyag mentes ezektől a fázisoktól. A vegyületképződés által

létrejött komplex fázisok negatívan befolyásolják a Silafont36 típusú ötvözet mechanikai tulajdonságait, amely így elmarad a vevői specifikációtól. A technológiában alkalmazott paraméterek (olvasztási hőmérséklet, gáztalanítás, öntési hőmérséklet, az ötvözőelemek korrekciója, mesterséges öregítés) optimalizálása mellett a legfontosabb a vasban dús intermetallikus fázisok megjelenésének elkerülése és forrásának feltárása.

Ennek érdekében további kísérletekkel kívántam fejleszteni az ötvözetolvasztási és hőkezelési technológiánkat. A fentebb ismertetett megállapítások és kísérleti eredmények szerint, a Silafont36 öntészeti ötvözet különösen érzékeny a vasas-mangános vegyületképzésre, kiváltképp más, öntészeti ötvözettel való találkozásból eredő, szennyezőelemek átöröklődése lévén. Annak érdekében, hogy ezen intermetallikus vegyületfázisok kialakulását megelőzzem, a kísérleti öntési folyamatom számos gondos előkészületi munkafázis előzte meg.

Az olvasztási technológia során túlhevítést nem alkalmaztam, és teljesen új, más ötvözettypus szennyezettségétől mentes kihordó üstöt alkalmaztam. A tégely előmelegítésénél tégely előmelegítő berendezés alkalmazási lehetőségének hiányában magával a kísérleti olvadékkal történő előmelegítést alkalmaztam, mely a későbbi eredményeim sajnos nagyban befolyásolta, az oldott gáztartalom miatt. A fémhordó üst tisztasága mellett mind az olvasztó-, mind a hőtartó kemence előkészítése falazattisztító készítmények alkalmazásával történt.

A kísérleti olvadék előállítása kizárólag tömbösített alapanyag felhasználásával történt, mely a szövetszerkezet vizsgálat során minimális vastartalom jelenlétére utalt.

Az olvadék oldott gáztartalmának minimalizálása, rövidebb kezelési idők alkalmazása mellett a K3 kísérlet során eredményezte, amely 2,55 DI% volt. A kezelőszó alkalmazhatóságának vizsgálata alapján elmondható, hogy a só képes komplex vegyületeket alkotni jelen ötvözettel, ám nem okoz erős szennyezettséget ($K=0,95$, a legrosszabb esetben is a K3* során), ezért csak indokolt, erősen szennyezett visszatérő hulladék olvasztásakor ajánlanám alkalmazását. A salak fém tartalmát tekintve elősegíti a porszerű salak képződését, ám a tisztasági értékek figyelembevételével nem kimondottan szükséges ezen só folyamatszinten történő alkalmazása.

A kísérleti olvadékból előállított darabokat öntött, T5 és T6 állapotban vizsgáltam mind szövetszerkezet, mind mechanikai tulajdonságok szempontjából. Az öntött szövetelemek vizsgálatakor megállapítható, hogy a Sr-al való ötvöztetés kedvező hatása igazolódik be, hiszen a szövetben jelen lévő, vasas vegyületek a kedvezőbb, poligon morfológiával kristályosodtak az α -Al dendritek határain. Emellett, az öntött szövet eutektikuma szép, homogén eloszlású, ám

apró, tűszúrásokra emlékeztető pontok láthatóak a dendritek csiszolatain, melyek a megnövekedett oldott gáztartalomra vezethetőek vissza, mely a kihordóüst falazatának égetésekor keletkezett. A T5 megeresztés után a szövetek jelentős mértékben nem változtak az öntött állapothoz képest, ellenben a T6-os eljárások után igen, melyek így a szakirodalomban ismertett szövetszerkezeti képekre nagymértékben hasonlítanak, és homogénen eloszló vegyületfázisokat, eutektikumokat tartalmaznak, ezáltal jobb mechanikai tulajdonságokra engednek következtetni. Fontos kiemelni, hogy a T5-ös eljárás nem, míg a T6-os hőkezelés alkalmas a Sr-al való esetleges túllötvőzés káros mellékhatásait, azaz a stronciumos vegyületkiválások visszaoldódását elősegíteni.

A mechanikai tulajdonságok elemzésekor az öntött állapotú darabok nyúlásai igen kedvezőek voltak, jóval a minimum elvárt 5% felett. Azonban a folyáshatár és szakító szilárdság elmaradt a vevői elvárásokhoz képest, a folyáshatár az SA1 terület esetében $119,51 \pm 3,40$ MPa, az SA2 terület esetében pedig $116,05 \pm 1,15$ MPa volt. A szakítószilárdság az SA1 próbatestek esetében átlagosan $250,36 \pm 5,77$ MPa-t, míg SA2 esetben $225,34 \pm 5,52$ MPa-t eredményeztek. A nyúlások SA1-nél $6,77 \pm 0,43\%$ -ot, SA2-nél pedig $5,49 \pm 0,86\%$ -ot mutattak.

A T6-os hőkezelési eljárások után a folyáshatár és szakítószilárdság egyértelműen jól reagált a kezelésekre, extrém magas értékeket is prezentáltam az öntött, és T5 állapothoz képest, ugyanis a folyáshatár bizonyos esetekben a 235 MPa-t is meghaladta, ami több, mint 50%-os növekedés a T5-ös eredményekkel szemben. A szakítószilárdság helyenként meghaladta a 290 MPa-t is, mely 8%-al magasabb korábbi, T5-ös eredményekhez képest. A nyúlás sok esetben inkább elmaradt, helyenként 35%-al csökkent a T5-ös eredményekhez viszonyítva, azonban láthatunk 12-59%-os növekedéseket is az eredmények összehasonlításakor. A százalékos értékeket figyelembe véve a 490°C-on 3 óráig homogenizált, majd 165°C-on megeresztett, illetve az 520°C-on 1 óráig homogenizált, majd 160°C-on megeresztett eljárások a legeredményesebbek. A szakító próbatestek töreteinak vizsgálata alapján elmondható, hogy az öntött szövetben jelen lévő gázzárványok hő hatására történő tágulása akadályozta az esetek többségében a szövettel szemben elvárt nyúlási értékeket, emellett, a szövet vas-mangán tartalmú vegyületek kiválása mellett is képes magas nyúlás (>5%) elérésére.

A dolgozatban ismertett eredmények alapján úgy gondolom, hogy a kísérletek során ismertett feltételek és olvasztástechnológia betartásával, illetve T6-os hőkezeléssel, valamint az eszközpark bővítésével képesek leszünk előidézni azokat a mechanikai tulajdonságokat, melyeket a vevő elvár az egyes mintavételi területekből származó próbatestek elszakítása után.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Eunkyung L., Brajendra M., Effect of solidification cooling rate on mechanical properties and microstructure of Al-Si-Mn-Mg alloy. The Japan Institute of Metals and Materials, Materials Transactions, Vol. 58. No. 11 (2017) pp. 1624 to 1627
- [2] Dr. Jónás Pál, Könnyűfém öntészeti ismeretek, Miskolc, Nemzeti Tankönyvkiadó, 2011
- [3] Fegyverneki György, Alumínium hengerfej öntvények repedés-érzékenysége, P.h.d értekezés, Miskolc, 2007
- [4] Rheinfelden alloys online katalógus, 2015, <https://rheinfelden-alloys.eu> (2023.11.14.)
- [5] Bubenkó Marianna, Tokár Monika, Fegyverneki György, Investigations to reducing inclusion content in melt Aluminium, MultiScience – XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, Hungary, 20-21 April 2017
- [6] Martin Hartlieb, Aluminium Alloys for Structural Die Casting, Die Casting Engineer Online Magazine, May, 2013 <https://www.diecasting.org/dce> (2023.11.14.)
- [7] R. Franke, D. Dragulin, A. Zovi, F. Casarotto, Progress in ductile aluminium high pressure die casting alloys for the automotive industry, Memorie: Die casting, La metallurgia Italiana, Magazin, 2007/05 19-20
- [8] Mahmood Aliofkhazraei, Intermetallics Compounds: Formation and Applications, Intermetallics Formation and their Effect on Mechanical properties of Al-Si-X Alloys, Chapter 2, London 2018 pp. 30-37
- [9] Bekus Orsolya, In-situ ötvözetfejlesztés szekunder öntészeti ötvözet felhasználásával, Diplomamunka, 2020
- [10] Bíró Nóra, Az olvadékkezelés hatása az öntészeti AlSi ötvözetek zárványosságára, szakdolgozat, Miskolc, 2013
- [11] P. Ashtari, H. Tezuka, T. Sato, Influence of Sr and Mn Additions on Intermetallic Compound Morphologies in Al-Si-Cu-Fe Cast Alloys, Materials Transactions, Vol. 44, No. 12 (2003) pp 2611 to 2616
- [12] F. Paray, B. Kulunk, J. Gruzleski, Effect of strontium on microstructure and properties of aluminium based extrusion alloy 6061, Materials Science and Technology, Vol. 12 (1996) pp 315-322

[13] Orosz Adrienn, Silafont36 öntészeti ötvözet mechanikai tulajdonságait befolyásoló paraméterek vizsgálata, szakdolgozat, Miskolc, 2021