

# Eltérő kezelősók és Al-5%Ti-1%B előötvözet-adagolás olvadékmínőségre gyakorolt hatásának összehasonlító vizsgálata EN AC-45500 ötvözet esetén

## Comparative analysis of the effect of different fluxes and Al-5%Ti-1%B master alloy addition on the melt quality of EN AC-45500 alloy

BOGOLY LEVENTE,

kohómérnök MSc-hallgató, E-mail: bogoly.levente@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4634-0690  
Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet

DR. MENDE TAMÁS,

egyetemi docens, E-mail: tamas.mende@uni-miskolc.hu, ORCID: 0000-0002-3034-9823  
Miskolci Egyetem, Fémteni Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

DR. FEGYVERNEKI GYÖRGY,

termék- és folyamatmérnökségi osztályvezető,  
E-mail: gyorgy.fegyverneki@nemek.com, ORCID: 0000-0001-5550-9080  
Nemak Győr Alumíniumöntöde Kft., 9027 Győr Ipari park

GYARMATI GÁBOR,

tanársegéd, E-mail: gabor.gyarmati@uni-miskolc.hu, ORCID: 0000-0001-7568-6922  
Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet



*Kutatómunkánk során rotoros gáztalanító olvadékkezelést hajtottunk végre három különböző sókeverékkel és Al-5%Ti-1%B előötvözet-adagolással Al-7%Si-0,5%Cu-0,4%Mg ötvözetben. A vizsgálati eredmények kiértékelése során a különböző segédanyagokkal történő kezelések olvadék- és öntvényminőségre gyakorolt hatásait hasonlítottuk össze, kiemeltképpen figyelve a szemcsefinomítás hatékonyságára és az öntvényekben kialakuló porozitás mértékére. Vizsgáltuk továbbá a kezelések során elérhető olvadéktisztítás és gáztalanítás hatékonyságát is.*

**Kulcsszavak:** öntészeti alumínium ötvözet, olvadékkezelés, rotoros gáztalanítás, olvadéktisztítás, szemcsefinomítás, sókeverék, előötvözet

*Rotary degassing coupled with the addition of different fluxes is the most common melt treatment method in aluminum foundries, due to its high efficiency in inclusion removal and the possibility of grain refining. In this study, the effect of different fluxes and master alloy addition was investigated on the melt and casting quality in different stages of the melt preparation.*

*Four experiments were conducted, which are labeled as “A”, “B”, “C” and “D”. In all cases, EN AC-45500 alloy (the standard composition in weight percentage is 7% Si, 0.5% Cu, 0.4% Mg, 0.12% Ti) was melted in a shaft-type melting furnace and then approximately 1000 kg was poured into a resistance-heated holding crucible furnace. In case “A” we applied a melt cleaning flux, whereas in case “D” we used the same flux combined with the addition of Al-5%Ti-1%B grain refining master alloy. In cases “B” and “C”, cleaning and grain refining fluxes from different suppliers were used.*

*Each experiment consisted of 5 melt treatment cycles with 9 minutes long treatment time, the N<sub>2</sub> purging gas flow rate was 20 ± 2 l/min and the pressure was equal to 5 ± 1 bar. The rotational speed of the impeller was 490 rpm during the vortex formation and 380 rpm in the degassing phase. 800 ± 30 g of the granulated fluxes was added in all cases. The melt cleanliness and grain refinement were examined in different stages of the melt preparation; after pouring it into the crucible, right after and 15 minutes after the melt treatment, and finally before the next pouring into the holding furnace (approximately 200 kg residual melt at the bottom of the crucible).*

*During the experiments, the evolution of the inclusion content was investigated by the fracture surfaces of K-mold samples. The mechanical properties (elongation, yield strength, ultimate tensile strength) were measured by tensile test of samples machined from the castings, and the quality index was also calculated. The oxide inclusions found on the fracture surfaces of the K-mold samples were examined by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS).*

The degree of grain refinement and the nucleation temperature were investigated by thermal analysis in different stages of the melt preparation. The exact grain size was measured by image analysis of the polished and Barker-etched thermal analysis samples. The susceptibility to pore formation was compared by Density Index samples, X-ray analysis, and metallographic investigation of polished surfaces from the castings.

The chemical composition of the melt was measured by optical emission spectroscopy (OES) in different stages of the melt preparation, while the phase composition of the applied fluxes was analyzed by X-ray diffraction (XRD).

**Keywords:** aluminum casting alloy, melt treatment, rotary degassing, melt cleaning, grain refining, flux, master alloy

## 1. Bevezetés

Napjainkban az öntészeti alumínium-szilícium ötvözeteket (Al-Si ötvözet) széles körben alkalmazzák a jármű- és repülőgépiparban, ahol a magas minőségügyi követelményeket is kielégítő öntvények gyártása érdekében, elengedhetetlen szempont a megfelelő metallurgiai minőségű fémolvadék előállítása. Szükséges az alumíniumolvadék oxidzárványoktól való megtisztítása, az oldott gáztartalom csökkentése, valamint a kristályosodás során lejátszódó folyamatok kontroll alatt tartása. Ilyen többek között a primer alumíniumfázis ( $\alpha$ -Al) szemcsefinomítása, az eutektikum morfológiájának módosítása, továbbá az intermetallikus vegyületfázisok minőségének, morfológiájának és mennyiségének szabályozása.

Az alumíniumolvadékokban jelenlévő oxidzárványok állandó velejárói a napjainkban alkalmazott öntészeti és olvadékkezelési technológiáknak. Ezt eredményezhetik többek között a nem megfelelően kivitelezett olvadék-előkészítési műveletek, valamint az alumínium nagy reakciókészsége is. Ezen oxidzárványok önmagukban is erősen rontják a formaképző képességet, a táplálhatóságot és az öntvények szilárdsági tulajdonságait, továbbá az oldott gáztartalommal együtt aktív szerepük van az anyaghiányos helyek, azaz a lunkerek és a porozitás kialakulásában [1–4].

A szemcsefinomítás jelentősen befolyásolja az öntvények mechanikai tulajdonságait, a kisebb átlagos szemcseméretet, és egyenletesebb szemcseméret-eloszlást eredményez növelve ezzel a szilárdsági és szívóssági értékeket. Javíthatók továbbá az önthetőségi tulajdonságok, a táplálhatóság, csökken a melegrepe-

déssel szembeni érzékenység, és ellenállóbbá válnak az öntvények a fásztó igénybevételekkel szemben. Az öntödék számos olvadékkezelő eljárást, valamint olvadéktisztító és szemcsefinomító segédanyagot alkalmaznak világszerte. Éppen ezért kulcsfontosságú szerepe van az alkalmazott segédanyagok megválasztásának, valamint adagolásuk módjának és mennyiségének, kiemelten a nagy kapacitású szériagyártások esetén [1, 2, 5, 6].

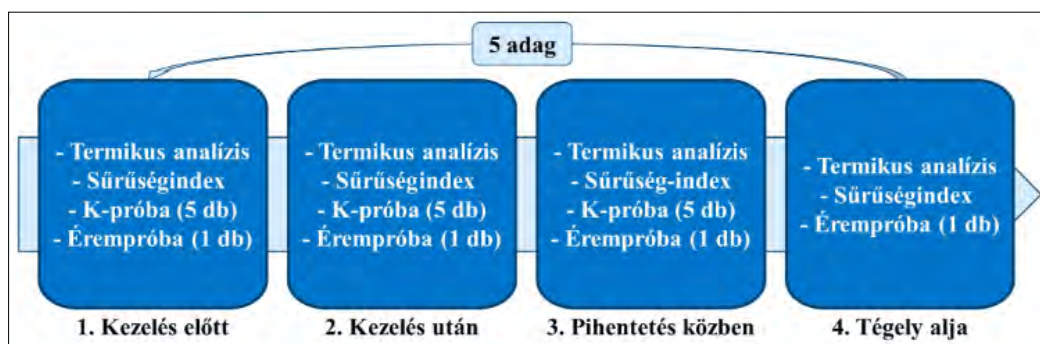
## 2. Vizsgálati körülmények

Kutatómunkánk során Al-7%Si-0,5%Cu-0,4%Mg ötvözetolvadék rotoros gáztalanítással egybekötött, gépi sóadagolásos kezelőeljárásainak olvadék- és öntvényminőségre gyakorolt hatásait hasonlítottuk össze. A kapcsolódó kísérletekre üzemi körülmények között került sor a Nemak Győr Alumíniumöntöde Kft. gyáregységében.

Vizsgálataink alatt összesen négy kísérletet végeztünk, melyek során Al-5%Ti-1%B szemcsefinomító előötvetetet és három különböző sókeveréket („A”, „B”, „C”) alkalmaztunk az olvadékkezelések közben (1. táblázat). Minden kísérlet alkalmával öt adag, egyenként körülbelül egy tonna tömegű folyékony fémot vizsgáltunk. A mintavételezés minden esetben az ellenállásfűtésű téglyes hőtartó kemencéből történt az 1. ábra szerint. Az olvadékciklus elején a transzportüstből való áttöltés és felzékretég-eltávolítás után került sor az első minták öntésére. A gáztalanításkor keletkezett salakréteg eltávolítását követően, a második, majd az olvadék pihentetése közben, 15 perc elteltével a harmadik mintavétel is megtörtént. Az utolsó próbák öntése a téglye aljáról történt, amikor

1. táblázat. Olvadékkezelések során alkalmazott segédanyagok

Kísérlet	Olvadéktisztító sókeverék	Szemcsefinomító segédanyag	Sóadagolás	
			Tömeg [g]	Időtartam [s]
A	„A” tisztító	–	800 ± 30	28
B	„B” tisztító és szemcsefinomító sókeverék		800 ± 30	43
C	„C” tisztító és szemcsefinomító sókeverék		800 ± 30	50
D	„A” tisztító	AlTi5B1(14 pálca)	800 ± 30	28



1. ábra. A mintavételezés folyamata a hőntartó kemencéből

a fémszint egy bizonyos érték alá (körülbelül 200 kg olvadék) csökkent a gyártás következtében. A kísérlet során az olvadékhőmérséklet jelentősen nem változott, végig  $760 \pm 10$  °C volt.

Kísérleteink során a primer alumíniumfázis kristályosodási túlhűlésének megállapítása céljából minden mintavételezéskor termikus analízisvizsgálatot végeztünk. A körülbelül 100 g tömegű olvadék öntőformája egy 200 °C-ra előmelegített acéltégely volt. A mintadarab hőmérsékletének időbeli változását egy védőcsővel ellátott K-típusú hőelem segítségével, 10 Hz-es adatgyűjtési frekvenciával rögzítettük [5].

A különböző szemcsefinomító segédanyagokkal végzett olvadékkezelések hatására elért szemcseméret kvantitatív jellemzése érdekében a termikus analízismintákat elvágtuk, és metallográfiai csiszolatokat készítettünk. A polírozást követően a mintákat Barker-reagens felhasználásával színesmarattuk, majd polarizációs szűrővel ellátott fénymikroszkóppal vizsgáltuk. Az elkészített szövetszelvények kiértékelése során meghatároztuk az  $\alpha$ -Al-szemcsék egységnyi területre eső számát és lineáris metszék hosszát is az ImageJ Fiji képelemző szoftver segítségével [7, 8].

Az eltérő tisztító sókeverékekkel végzett kezeléseken átesett olvadékok gázporozitás képződési hajlamának kvantitatív minősítése céljából sűrűségindex-meghatározást alkalmaztunk, melyhez két minta szükséges. Az egyik egy acéltégelybe öntött 80 mbar nyomáson dermedő (RPT), a másik egy rézkokillába öntött atmoszférikus nyomáson dermedő (ATM) minta. A vákuumkamrában lejátszódó kristályosodás során az alumíniumolvadékban nagymértékben lecsökken a hidrogénatomok oldhatósága, és könnyebben végbemegy a hidrogéngáz pórusok belsejében történő kiválása. Mindez a pórusok látványos növekedését és így a minta sűrűségének csökkenését okozza. Ezzel szemben a rézkokilla jó hővezetőképessége által biztosított nagy lehűlési sebesség miatt az atmoszférikus nyomáson dermedő mintában a pórusnövekedési folyamatoknak alig van idejük végbemenni, így az ATM-minták sűrűsége szinte megegyezik az alumíniumötvözet elvi sűrűségével. A sűrűségindex-értékek

kiszámítása a két minta sűrűsége alapján történik [4, 9, 10].

Az olvadék zárványtartalmának minősítése céljából mintavételezésenként öt darab K-kokillás próbát öntöttünk. A minták eltörését követően a töretfelületeket sztereomikroszkóp segítségével vizsgáltuk, hogy a pontosság érdekében a szabad szemmel nem látható, apróbb zárványok is jól megkülönböztethetők legyenek az alapszövettől [3, 4].

A K-kokillás próbák töretfelületein talált zárványok közül néhányat pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével is megvizsgáltuk, valamint energiadiszperzív mikroszondával (EDS) is elemeztük.

A fémfürdő kémiai összetételében bekövetkező változások vizsgálata érdekében minden mintavételezés során egy darab érempróbát öntöttünk. Ezeket később optikai emissziós spektroszkópiával vizsgáltuk mintánként három különböző mérési pontban.

A gyártócégek többnyire nem közlik az általuk forgalmazott kezelősók kémiai összetételét, ezért az egyes sóalkotó vegyületfázisok meghatározása érdekében röntgendiffraktométeres (XRD) vizsgálatot alkalmaztunk. Az azonosított komponensek mennyiségi meghatározása Rietveld-analízis által történt.

Egy adag fémolvadék körülbelül 26–29 hengerfej öntésére volt elegendő, így kísérletenként átlagosan 130 és 145 között volt a termelt darabszám. Az öntvények közül kísérletenként hat darabot választottunk ki, melyekből szakító próbapalcákat, valamint egy porozitásproblémával rendelkező területről mintacsiszolatokat munkáltunk ki.

Az olvadékkezelés folyamata teljesen automatizált, így a rotoros gáztalanítás és a kezelősó-adagolás is az előre beállított értékek szerint történt (2. táblázat). A kezelési paraméterek minden kísérlet során azonosak voltak. A tölcserképzés és sóadagolás három részre tagolódott, az előtölcserképzés, a sóadagolás, mely minden esetben azonos mennyiségben, de eltérő idők alatt történt (1. táblázat), majd végül az utótölcser került sorra. A gáztalanítás során az alkalmazott öblítőgáz kváziinert, N<sub>2</sub>-gáz volt. A folyamat időtartama átlagosan 9 perc volt, ezt követően a rotor

2. táblázat. A kísérletek során alkalmazott olvadákezelési paraméterek

Tölsérképzés				Gáztalanítás				
Előtöltés	Sóadagolás	Utótöltés	Rotor fordulatszáma	Időtartam	Öblítőgáz	Gázátfolyás	Gáznyomás	
5 s	800 ± 30 g	20 s	490 rpm	380 rpm	9 min	N <sub>2</sub>	20 ± 2 l/min	5 ± 1 bar

és a lapát kiemelkedett a fémfürdőből, és megtörtént a képződött salakréteg eltávolítása.

### 3. A vizsgálati eredmények kiértékelése

#### 3.1. A szemcsefinomító sókeverékek kémiai összetételének elemzése

A kísérletek során alkalmazott sókeverékek közül a „B” és „C” nemcsak olvadáktisztító, hanem szemcsefinomító hatással is bír a gyártók szerint. Az XRD-vizsgálattal beazonosított vegyületalkotók és az ezekhez tartozó koncentrációértékek a 3. és 4. táblázatban láthatóak.

A „B” jelű sókeverék eredményei alapján összesen 12 vegyület jelenlétét sikerült detektálni, így elmondható, hogy egy komplex, sokalkotós összetételű sókeverékről van szó. Az egyszerűbbektől kezdve egészen sok elemből álló vegyületek is megtalálha-

tóak, így a molekulatömegek is igen széles skálán mozognak. Éppen ezért az összetételi arányok szemléletesebb bemutatása érdekében a Rietveld-analízissel kapott tömegszázalékokat mólszázalékba is átszámítottuk az egyes sóalkotók moláris tömegének segítségével. A táblázatban feltüntetett sóalkotók között megtalálhatóak kloridok, fluoridok, oxidoldó és oxidáló vegyületek is. Viszonylag nagy mennyiségben vannak jelen titán- és bórtartalmú fázisok, melyek az egyéb hatásaik mellett a szemcsefinomító célú TiB<sub>2</sub>-szemcsék képződésében is részt vehetnek. A titánnal történő mikroötvözés céljából legelterjedtebben alkalmazott sóalkotó a K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>, melyet magas ára miatt a gyártó feltehetőleg más titántartalmú oxidásványokkal (K<sub>2</sub>Ti<sub>6</sub>O<sub>13</sub>, CaTiO<sub>3</sub>) próbált bizonyos mennyiségben kiváltani [11, 12].

A „C” jelű sókeverék eredményei alapján összesen hat vegyület jelenlétét sikerült detektálni, így az előzőhöz képest egyszerűbb összetételű kezelőanyagról beszélhetünk. A KCl- és NaCl-komponenseket gyakran alkalmazzák együttesen, mivel viszonylag alacsony olvadáspontú (657 °C) eutektikumot képeznek egymással. A NaF szintén elterjedt vegyület, mely a zárványok sóolvadék általi megfelelő nedvesíthetőségéért felel. A szemcsefinomító hatású TiB<sub>2</sub>-fázishoz szükséges bórtartalmat a KBF<sub>4</sub> biztosítja, a titántartalmat pedig K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> és K<sub>2</sub>NaTiOF<sub>5</sub> vegyületek, melyek közül az utóbbi feltehetőleg oxidáló hatással is bíró oxifluorid komponens [11–14].

3. táblázat. A „B” sókeverék diffraktogramja alapján azonosított vegyületek és koncentrációik

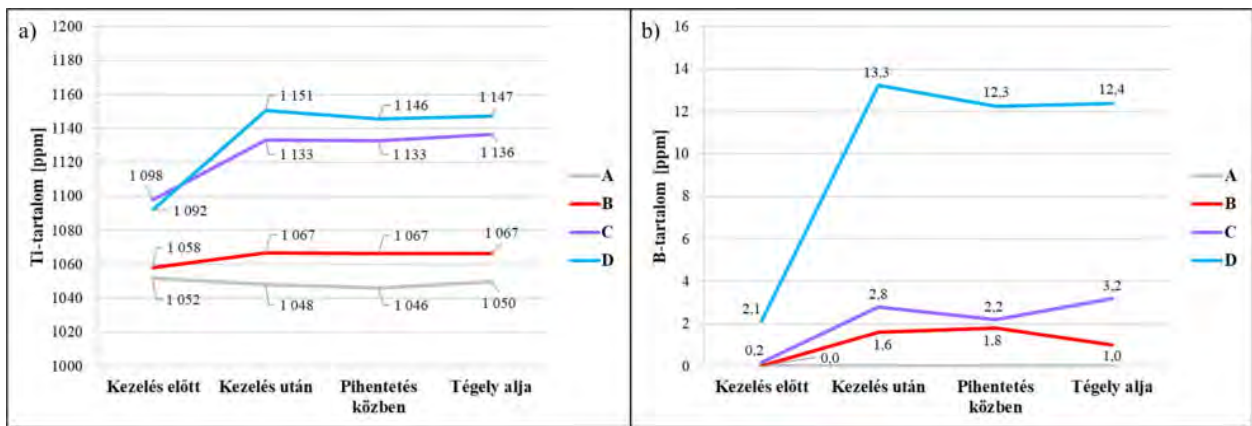
Sóalkotó [-]	Moláris tömeg [g/mol]	Koncentráció [m/m%]	Koncentráció [n/n%]
KBF <sub>4</sub>	125,91	29,28	41,67
K <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	233,44	20,92	16,05
K <sub>2</sub> Ti <sub>6</sub> O <sub>13</sub>	573,42	11,55	3,61
Ca <sub>4</sub> Mg(B <sub>4</sub> O <sub>6</sub> (OH) <sub>6</sub> )(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	546,02	8,67	2,84
Na <sub>2</sub> Ca(PO <sub>4</sub> )F	200,10	6,27	5,62
K <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>	240,07	5,28	3,94
NaNO <sub>3</sub>	85,01	5,28	11,13
KCl	74,60	3,29	7,89
KCa <sub>4</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (F,OH)·8H <sub>2</sub> O	924,47	3,19	0,62
CaTiO <sub>3</sub>	135,97	2,79	3,67
NaCa <sub>2</sub> (Mg <sub>4</sub> Al)(Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> )O <sub>22</sub> F <sub>2</sub>	840,00	1,99	0,42
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106,01	1,49	2,53

4. táblázat. A „C” sókeverék diffraktogramja alapján azonosított vegyületek és koncentrációik

Sóalkotó [-]	Moláris tömeg [g/mol]	Koncentráció [m/m%]	Koncentráció [n/n%]
K <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub>	240,07	25,83	10,95
NaCl	58,50	25,53	44,43
KBF <sub>4</sub>	125,91	19,52	15,79
K <sub>2</sub> NaTiOF <sub>5</sub>	260,07	13,51	5,29
KCl	74,60	13,51	18,44
NaF	42,00	2,10	5,10

#### 3.2. A kezelőanyagok hatása az olvadék kémiai összetételére

Az optikai emissziós spektroszkópia eredményei alapján elmondható, hogy a titán és bór kivételével nem volt jelentős változás a vizsgált elemek koncentrációja esetében. A különböző titán- és bórtartalmú vegyületfázisokat elsősorban szemcsefinomítás céljából alkalmazzák az öntészetben, így ennek hiányában az (A) kísérlet során mérhetőek a legkisebb koncentrációértékek



2. ábra. A kísérletek különböző fázisaiban öntött érempróbakon mért átlagos titán- és bórtartalom

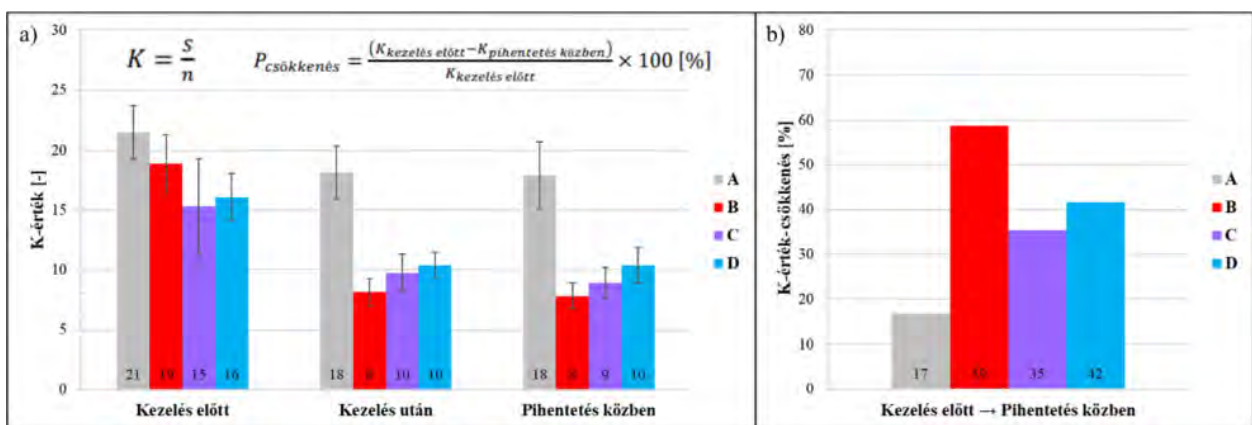
(2. ábra). A többi kísérlet esetén mind a titántartalom, mind a bórtartalom növekedése megfigyelhető a szemcsefinomítás következtében. Ezek közül az Al-5%Ti-1%B előtötvözet-adagolás hatására nőttek legnagyobb mértékben a koncentrációk. A (C) és (D) esetekben az ötvözt követően az értékek kismértékű csökkenése, majd a tégely alján növekedése tapasztalható. Ez feltehetőleg a szilárd vegyületfázisok ülepedésének és ezáltal a tégely alján bekövetkező dúsulásának köszönhető [1].

### 3.3. A zárványtartalom vizsgálata

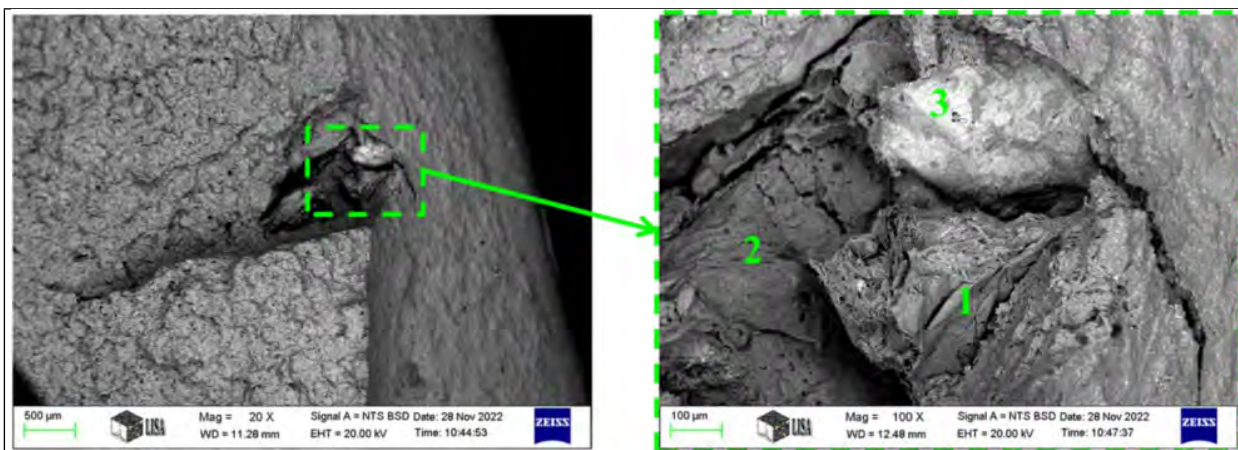
A K-kokillás próbák töretfelületeinek sztereomikroszkóp segítségével történő kiértékelése során kapott eredményeket a 3a. ábra mutatja be. Megállapítható, hogy minden kísérlet során a kezelés előtti állapot volt a legrosszabb, továbbá jól látható, hogy az egyes kísérletek kiinduló olvadátkinősége eltérő volt. Éppen ezért tartottuk fontosnak a K-értékek százalékos csökkenésének összehasonlítását, mellyel a kiindulási állapotoktól valamelyest függetlenül is képet kaphatunk a különböző tisztítósók hatékonyságáról. A 3b. ábra alapján elmondható, hogy az „A” kezelősóval végzett olvadátkisztítás (A kísérlet) hatékonyságát Al-5%Ti-1%B előtötvözet adagolásával kiegészítve

(D kísérlet) növelni lehet. A pihentetés közben a legkisebb zárványtartalom-értékek a (B) és (C) kísérletek során tapasztalhatóak, viszont közöttük nincs nagy eltérés. A százalékos csökkenéseket figyelembe véve jól látható, hogy a „B” sókeverék bizonyult hatékonyabbnak.

A 4. ábrán bemutatott töretfelület SEM-felvétele és EDS elemzése alapján arra következtethetünk, hogy mindhárom mérési ponton  $MgO \cdot Al_2O_3$  spinell oxidzárvány van jelen. A nagyított felvételen apró gyűrődéseket is megfigyelhetünk bizonyos helyeken, melyek tipikusan oxidhártyára utaló jelek. Amennyiben feltételezzük, hogy egy szétvált kettős oxidhártyáról van szó, úgy magyarázatot kapunk a mért nitrogéntartalomra is, mely a bezárt levegő oxidációját követő nitridációs folyamatok eredménye lehet. Az összetétel elemzése alapján több helyen kimutatható az eutektikus szilícium módosítására szolgáló stroncium jelenléte is. Ennek pontos megjelenési formája nem azonosítható, azonban feltehetőleg oxigén vagy egyéb elemekkel alkotott vegyületek formájában maradt vissza az oxidhártya felületén. Nyomokban megtalálhatóak még tipikus sóalkotó elemek is, mint nátrium, kalcium és klór, melyek nem tudtak az oxidhártyával a salakrétegbe üszni, így visszamaradtak az olvadátkban. Megjelenési formájuk, a mért összetétel



3. ábra. A kísérletek különböző fázisaiban jellemző K-értékek és K-érték-csökkenések



Mérési pont	Al [n/n%]	Mg [n/n%]	O [n/n%]	N [n/n%]	Si [n/n%]	Sr [n/n%]	Cu [n/n%]	Fe [n/n%]	Na [n/n%]	Ca [n/n%]	Cl [n/n%]
1	71,13	6,30	16,01	0,88	4,82	–	0,67	0,19	–	–	–
2	47,44	13,03	32,72	0,97	3,38	0,70	0,08	0,09	1,06	–	0,52
3	42,38	6,19	36,88	0,17	3,27	8,60	0,20	0,21	0,90	0,73	0,48

4. ábra. A K-kokillás próba töretfelületén megtalálható oxidzárvány SEM-felvétele

alapján lehet például NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub> vagy AlCl<sub>3</sub> vegyület. A mérőműszer által gerjesztett térfogatban megtalálhatók még szilícium és réz ötvözők is, továbbá vas szennyezőelem.

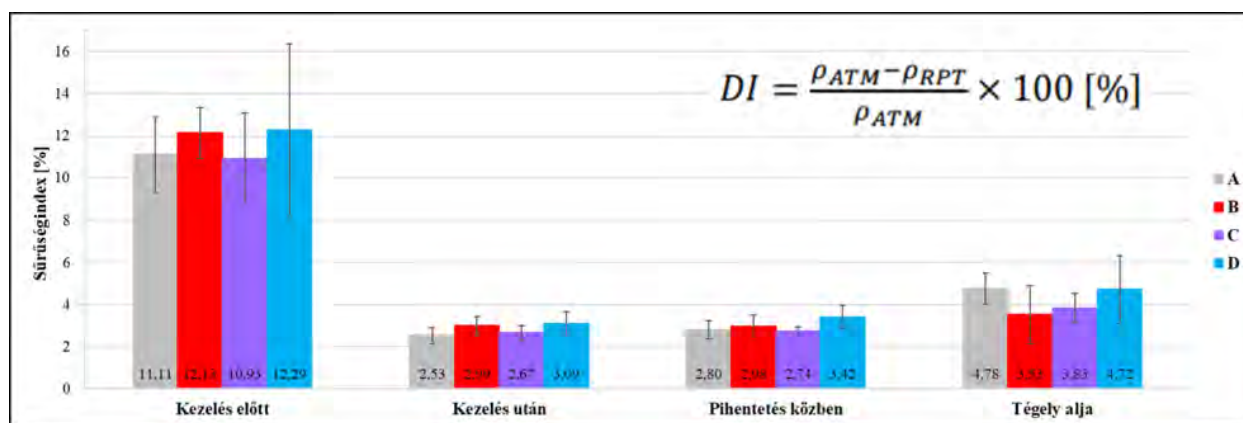
### 3.4. A sűrűségindex meghatározása

A sűrűségindex-értékeken (5. ábra) jól látható, hogy minden olvadékkezelés során jelentős mértékben csökkent (körülbelül 9% DI-csökkenés) az olvadék gázporozitás-képződési hajlama. Az (A) és (C) kísérletek kiinduló értéke körülbelül 11%, a (B) és (D) kísérletek kiinduló értéke pedig valamivel rosszabb, körülbelül 12% volt. Ez a tendencia a kezelés után is látható, ugyanis mindenhol hasonló arányban, körülbelül 75%-kal csökkent a sűrűségindex értéke. Elmondható, hogy az egyes olvadékkezelő

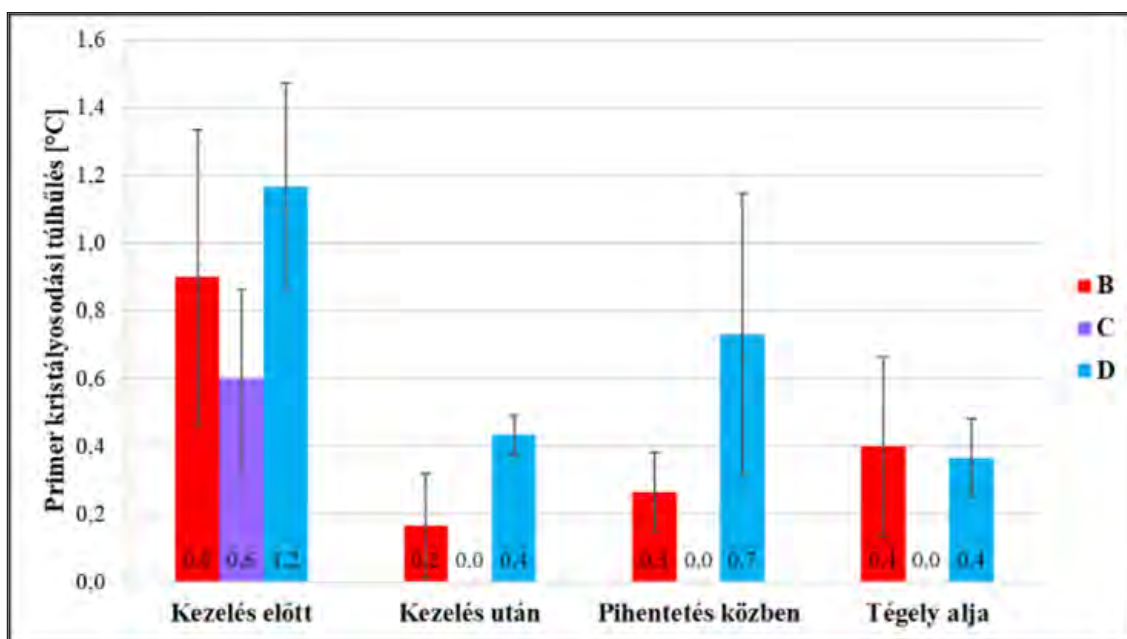
segédanyagok hatékonysága közel azonos, vagyis nem állapítható meg jelentős különbség a gázporozitás-képződési hajlamra gyakorolt hatásukban.

### 3.5. Termikus analízis

A kristályosodási túlhűlésértékeken (6. ábra) jól látható, hogy minden kezelőanyag alkalmazása jelentős mértékű csökkenéshez vezetett az olvadékkezelést megelőző állapotokhoz képest. A kezelés előtti, utáni és pihentetés közbeni értékekre ugyanaz a tendencia érvényes, miszerint legkisebb túlhűlés a (C) esetben volt, ezt követte a (B), majd pedig a (D) kísérlet. Amennyiben abból az elvből indulunk ki, hogy a túlhűlés mértéke fordítottan arányos a szemcsefinomsággal (kisebb túlhűlés esetén nagyobb egységnyi területre eső szemcseszám), úgy el-



5. ábra. A kísérletek különböző fázisaiban mért sűrűségindex-értékek



6. ábra. A kísérletek különböző szakaszaiban mért primer kristályosodási túlhűlések

mondható, hogy a legjobb eredményeket a „C” sókeveréssel értük el, amellyel a mérhető túlhűlés nullára csökkent, és ezt követően sem nőtt. A „B” sókeveréssel történő kezelést követően szintén hatékonyan csökkent a túlhűlés mértéke, viszont a hőtartás során kismértékű növekedés volt tapasztalható, azaz idővel a szemcsefinomító hatás bizonyos mértékben csökkent.

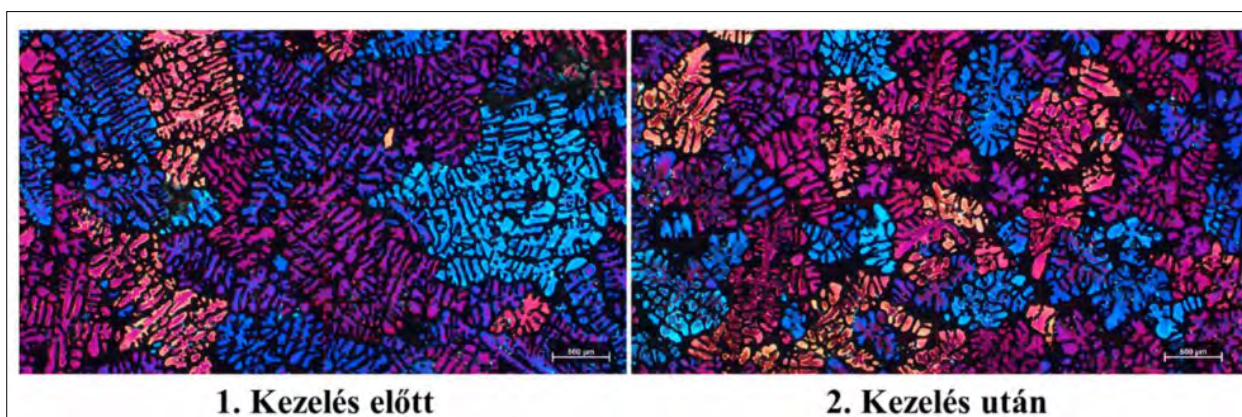
### 3.6. A szemcseméret meghatározása

A termikusanalízis-mintákról készített Barker-maratott szöveteleki felvételekre a 7. ábra mutat be példát. A képeken jól látható az olvadékkezelés hatására bekövetkező átlagos szemcseméret csökkenése.

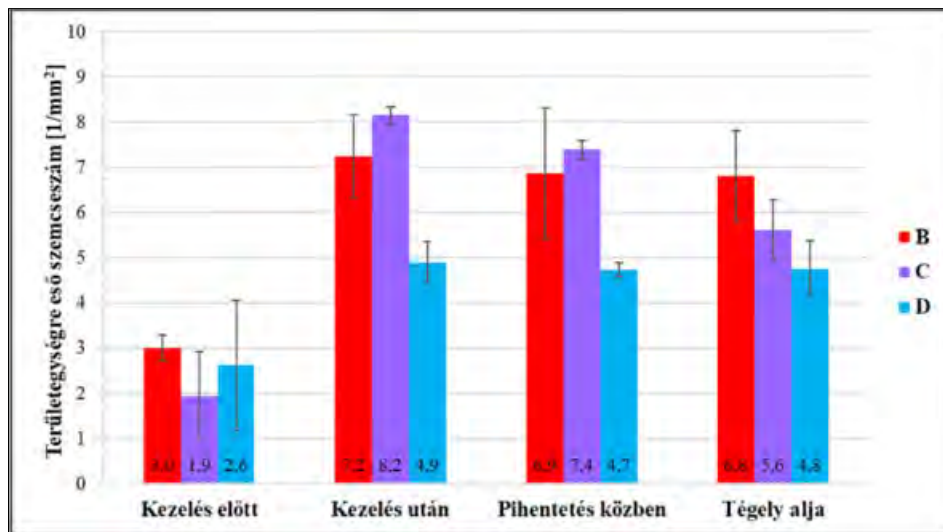
Kezdeti feltételezések szerint minél nagyobb a területegységre eső szemcseszám, annál kisebb a lineáris metszékhozz, és kisebb a mérhető kristályosodási túlhűlés értéke is. A 6. ábrát összehasonlítva a 8. és 9. ábrával nagymértékű hasonlóságot fedez-

hetünk fel az eredmények alakulásában. A kezelés előtti és a tégely aljáról történő mintavételek esetén van némi eltérés a három módszer eredményei között, azonban a kezelés utáni és pihentetés közbeni értékek teljes mértékben összhangban vannak. Mindhárom kiértékelés szerint a (C) kísérlet eredményeiből következtethetünk a legfinomabb szemcsestruktúrára, míg a legrosszabb értékeket a (D) kísérlet eredményezte.

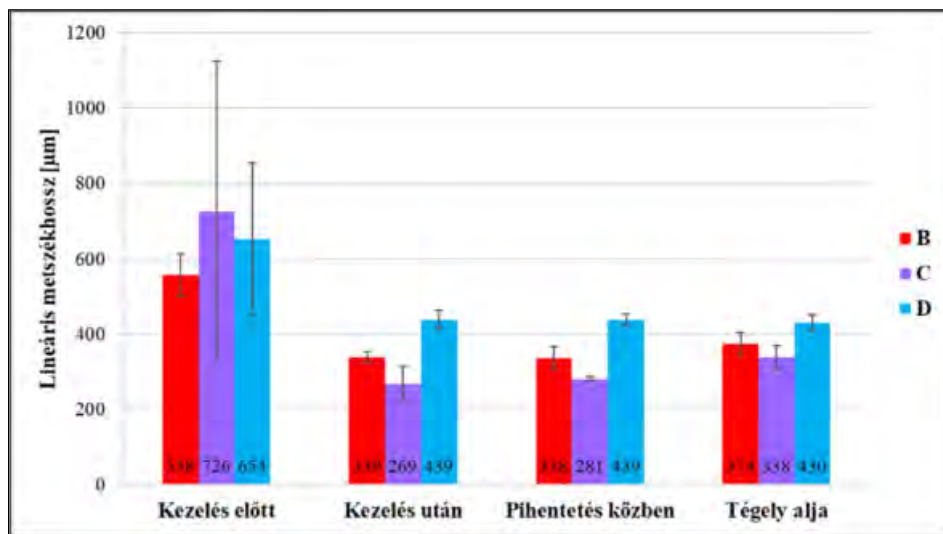
A termikus analízis alapján a legjobb eredményeket a „C” sókeverék hozta, amivel összhangban vannak a szemcseméret meghatározás eredményei is. A (C) kísérlet során mért túlhűlések alapján nem volt kimutatható a szemcsefinomító hatás csökkenése, azonban a Barker-maratott felvételek kiértékelése során mindkét módszer szerint bizonyos mértékű szemcsedurvulás állapítható meg a pihentetés közben és a tégely alján. A (B) kísérlet során alkalmazott szemcsefinomító segédanyag szintén elég hatékonynak



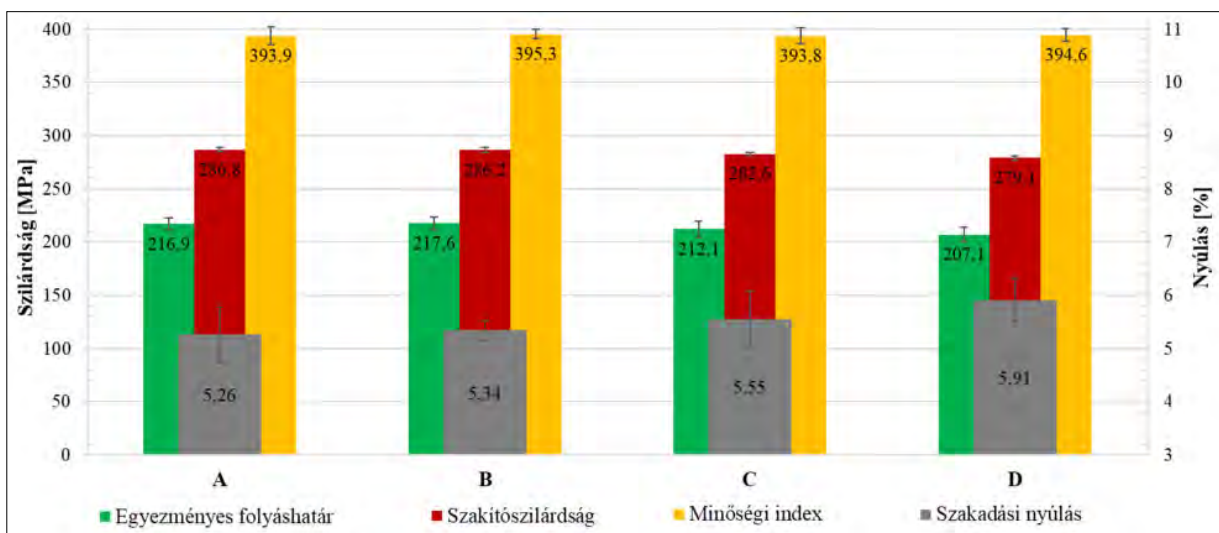
7. ábra. Barker-maratott minták polarizációs szűrővel készített szöveteleki felvételei (saját képek)



8. ábra. A kísérletek különböző szakaszaiban meghatározott területegységre eső szemcseszámok

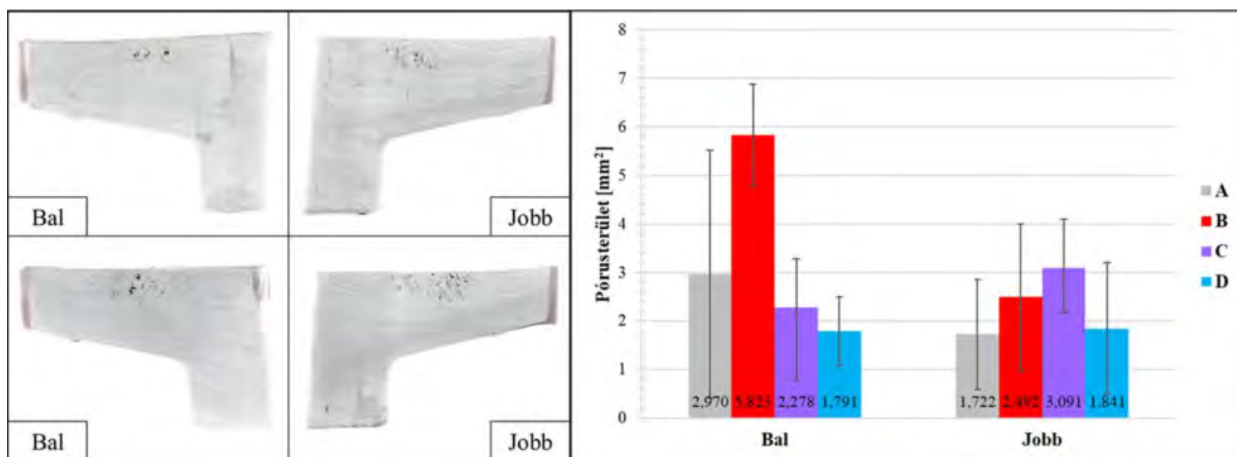


9. ábra. A kísérletek különböző szakaszaiban meghatározott lineáris metszékhosszértékek



10. ábra. Különböző kísérletek öntvényeire jellemző szakítóvizsgálati eredmények





11. ábra. Öntvényekből kimunkált mintacsiszolatok és pórussterület értékeik

mondható, az elért eredmény megközelíti a (C) kísérlet során produkáltakat.

### 3.7. Öntvények mechanikai tulajdonságai

A szakítóvizsgálatok eredményeinek, valamint a kiszámított minőségi indexek értékeinek átlagait és szórásait a 10. ábra ismerteti. Az oszlopdiagramok szerint az eltérő segédanyagokkal kezelt olvadékokból készült öntvények szilárdsági értékei között nincs számottevő különbség, továbbá a szórások mértéke is viszonylag alacsony. A legjobb szakítószilárdság és egyezményes folyáshatárértékeket az „A” tisztító, valamint a „B” tisztító és szemcsefinomító sókeverék esetén értük el. A szakítóvizsgálatok esetén nagyobb szakítószilárdsághoz általában kisebb nyúlásértékek tartoznak, ami jelen esetben is megfigyelhető. A legjobb szakadási nyúlást a (D) kísérlet esetén értük el, viszont a szakítószilárdság is itt bizonyult a legrosszabbnak. Emiatt szükséges a minőségi index meghatározása, melynek értékével mindkét fontos paramétert együttesen figyelembe véve minősíthetők az öntvények. A „C” sókeverék minden szempontból a közepes eredményekkel járt, így semmiben sem mondható kiemelkedőnek, a QI-értéket tekintve pedig ez a legalacsonyabb. A mechanikai tulajdonságokat átfogóan vizsgálva azt láthatjuk, hogy az arany közeputat a legjobb QI-értékkel rendelkező „B” sókeverék jelenti.

### 3.8. Az öntvényekben kialakult porozitás

A kísérletekből kiválasztott öntvények egyes területein szinte minden esetben porozitás volt megfigyelhető a röntgenvizsgálatok során. Az érintett helyekről hengerfejenként két mintát munkáltunk ki, majd csiszoltunk fel. Az elkészült mintákról felvételeket készítettünk (11. ábra), melyeket az ImageJ Fiji képelemző szoftver segítségével elemeztünk. Az összehasonlítás alapjaként meghatároztuk a mintafelü-

lettel elmesztett pórusok területének összegét (11. ábra).

A pórussterület-értékek szinte minden esetben elég széles szórásmezővel rendelkeznek, így az egyes kezelőanyagok esetén várható porozitás mértékét sajnos nem lehet megállapítani a vizsgált területen. Az eredmények azonban jól alkalmazhatóak összehasonlítás céljából. A legkisebb pórusképződési hajlamot és ezzel a legjobb eredményt a (D) kísérlet hozta, ezt követi a (C), majd kis lemaradással az (A). Végül a legnagyobb pórussterület a (B) kísérlet mintáin volt tapasztalható.

## 4. Összefoglalás

A vizsgálati eredmények kiértékelését követően az alábbi következtetések állapíthatók meg.

- ❑ A „C” tisztító és szemcsefinomító sókeverék nagyobb mértékben növeli az olvadék titán- és bórtartalmát, így sóalkotóiból feltehetőleg hatékonyabban képződnek TiB<sub>2</sub> aktív szemcsefinomító fázisok, mint a komplexebb összetételű „B” sókeverék alkotóiból.
- ❑ A K-kokillás próbák alapján a zárványtartalom csökkentésének szempontjából a „B” kezelősó volt a leghatékonyabb, ezt követte a „C”, majd az „A” só. Az „A” tisztító sókeverék hatékonysága Al-5%Ti-1%B előötvozlet-adagolással fokozható.
- ❑ A sűrűségindex-próbák értékei alapján mindegyik kísérlet során közel azonos volt a gázatlanító olvadékezelés hatékonysága.
- ❑ A lehülési görbék alapján meghatározott primer kristályosodási túlhűlések szerint a „C” sókeverékkel érhető el a legjobb szemcsefinomító hatás, mely a pihentetés közben sem romlik jelentősen. A „B” kezelősónál viszonylag lassú, míg az előötvozletnél gyorsabb lecsengés tapasztalható a pihentetési idő alatt.
- ❑ A területegységre eső szemcseszám- és a lineáris metszékhossz-értékek alapján, az ol-

vadékkézelést követően, a legfinomabb szemcse szerkezet a „C” sóval volt elérhető, azonban a pihentetés közben lecsengés volt tapasztalható. A (B) kísérlet eredményei szintén elég jónak bizonyultak, megközelítik a (C) kísérlet értékeit.

- A szakítóvizsgálatok alapján a különböző kísérletek eredményei között nem tapasztalható nagymértékű eltérés. A minőségi indexértékek szerint azonban a (B) kísérlet hozta a legjobb eredményt, ezt követően kis lemaradással a (D), az (A), majd a (C) kísérletek.
- A hengerfejekben megjelenő porozitás mértékének vizsgálata során a legnagyobb pórus-terület a (B) kísérletnél volt meghatározható. Ennél valamivel jobb értékeket mutattak az (A) és a (C) kísérletek. A leghatékonyabban a (D) kísérlet során sikerült csökkenteni a szívódás mértékét.

A vizsgálati eredmények alapján összességében elmondható, hogy olvadéktisztítás és szemcsefinomítás szempontjából a „B” és „C” sókeverékek bizonyultak a leghatékonyabbnak. A primer kristályosodási túlhűlések alapján elmondható, hogy a kezelősókkal szemben a szemcsefinomító előötvetet rövidebb lecsengési idővel rendelkezik. Ez a tendencia azonban nem érzékelhető a területegységre eső szemcse szám és a lineáris metszék hossz értékein, így ez pontosan nem megállapítható.

A különböző segédanyagokkal elért mechanikai tulajdonságokban nem tapasztalható jelentős eltérés, így a legideálisabb kezelőanyag kiválasztása során az ötvényekben megjelenő porozitás mértéke lesz a mérvadó. Mindezek alapján a „C” tisztító és szemcsefinomító sókeverék alkalmazása javasolt a szériagyártás során. Amennyiben azonban az „A” tisztító sókeverék kerülne felhasználásra, úgy mindenképpen ajánlott a kezelés kiegészítése Al-5%Ti-1%B előötvetet adagolásával.

### Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk kifejezni köszönetünket a Miskolci Egyetem Fémelőállítási és Öntészeti Intézetének, valamint a Nemak Győr Alumíniumöntőde Kft. dolgozóinak, akik helyszínt, eszközöket és hathatós segítséget nyújtottak a kísérletek megvalósításához.

A dolgozatban ismertetett kutatómunka a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP- 23-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Ku-

tatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



### IRODALOM

- [1] G. Gyarmati, L. Bogoly, M. Stawarz, G. Fegyverneki, M. Tokár: Grain refiner settling and its effect on the melt quality of aluminum casting alloys. *Materials*, 2022/15-7679
- [2] J. Campbell: *Complete Casting Handbook 2nd Edition – Metal Casting Processes*. In: Metallurgy, Techniques and Design. Butterworth-Heinemann, Boston, 2015
- [3] J. Wannasin, D. Schwam, J. F. Wallace: Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007/191, 242–246.
- [4] S. W. Hudson, D. Apelian: Inclusion detection in molten aluminum – Current art and new avenues for in situ analysis. *International Journal of Metalcasting*, 2016/10, 315–321.
- [5] F. C. Robles-Hernandez, J. M. H. Ramírez, R. Mackay: *Al-Si Alloys – Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications*, Springer International Publishing, 2017, 237.
- [6] L. Liu, F. H. Samuel: Effect of inclusions on the tensile properties of Al-7%Si-0.35%Mg (A356.2) aluminium casting alloy. *Journal of Materials Science*, 1998/33, 2269–2281.
- [7] P. J. Szabo, I. Kardos: Correlation between grain orientation and the shade of color etching. *Materials Characterization*, 2010/61, 814–817.
- [8] Standard Test Methods for Determining Average Grain Size – ASTM International, Designation: E112–12, 2013
- [9] A. M. Samuel, F. H. Samuel: Various aspects involved in the production of low hydrogen aluminium castings. *Journal of Materials Science*, 1992/27, 6533–6563.
- [10] D. Dispinar, J. Campbell: Critical assessment of reduced pressure test – Part 1. *International Journal of Cast Metals Research*, 2004/17, No. 5, 280–286.
- [11] R. Gallo D. Neff: *Aluminum Fluxes and Fluxing Practice*, ASM Handbook, 2008, Vol. 15 Cast., 230–239.
- [12] T. A. Utigard, K. Friesen, R. R. Roy, J. Lim, A. Silny, C. Dupuis: The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing. *JOM*, 1998/50, 38–43.
- [13] M. Máté, M. Tokár, G. Fegyverneki, G. Gyarmati: The comparative analysis of the inclusion removal efficiency of different fluxes. *Arch. Foundry Eng.*, 2020/20, 53–58.
- [14] C. Li, J. Guo Li, Y. Zhe Mao, J. Cheng Ji: Mechanism to remove oxide inclusions from molten aluminum by solid fluxes refining method. *China Foundry*, 2017/14, 233–243.