

Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar
Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

**Forgó mágneses mezős magneto-hidrodinamikai
keverővel ellátott kristályosító berendezés
kifejlesztése és vizsgálata**

PhD értekezés tézisei

Rónaföldi Arnold
okleveles villamosmérnök

Tudományos témavezető:
Dr. Roósz András
MTA levelező tagja, egyetemi tanár

Miskolc
2008

1. Bevezetés, célkitűzés

Fémeket és a fémek ötvözeit az emberiség a rézkortól napjainkig egyre szélesebb körben alkalmazta és alkalmazza. A fémek, és ötvözeik használata már régen a mindennapi életünk részét képezi. Az ipari fejlődés egyre specifikusabb tulajdonságú, de gazdaságosan előállítható fémeket és fémötvözeteket igényel. Ezen igényeknek való megfelelés indokolja a fémekkel és ötvözeivel kapcsolatos, széleskörű alap-, és alkalmazott kutatások nagy számát, amelyek a világ számos országában külön-külön, valamint együttműködés formájában folyik.

A fémekkel és ötvözeivel kapcsolatos kutatások keskeny szelete a kristályosodás folyamatának, és befolyásolhatóságának vizsgálata. (Ezeket a vizsgálatokat ma már nem csak földi körülmények között, hanem űrlaboratóriumban is elvégzik.)

Fémek és fémötvözetek kristályosodása közben - földi körülmények között- a fémolvadékokban áramlások vannak. Ezeknek az áramlásoknak az intenzitása és jellege befolyásolja a megszilárdult fém, illetve fémötvözet szövetszerkezetét, így azok tulajdonságait is. Ez a befolyás igen jelentős lehet, ezért fontos ennek a jelenségnek a vizsgálata.

A jelenség vizsgálata úgy történik, hogy különböző intenzitású és irányú, kívülről gerjesztett áramlásokat hoznak létre a kristályosítandó fém-, illetve ötvözet-olvadékokban (összefoglaló néven: fémolvadékokban). A kívülről gerjesztett áramlásoknak célszerűen intenzívebbeknek kell lenni, mint a belső áramlásoknak, vagyis a külső gerjesztés hatásának kell érvényesülni. Az így elvégzett vizsgálatokból következtetni lehet a külső gerjesztés nélküli áramlások hatására is.

Az áramlások külső gerjesztése történhet mechanikus (pl.: vibrációs), vagy magnetohidrodinamikai (MHD) úton.

A magnetohidrodinamika villamos vezetőképességgel rendelkező közegek, például villamos vezetőképességgel rendelkező folyadékok, mágneses és/vagy villamos térben történő áramlásával, áramoltatásával, állapotváltozásaival foglalkozik.

Villamos vezetőképességgel rendelkező folyadékok esetében a magnetohidrodinamika a folyadékok klasszikus hidrodinamikájától oly módon tér el, hogy ilyenkor a folyadékokra nemcsak a mechanikai erők (tehetetlenségi erők, rugalmas feszültségek, gravitáció) hatnak. Az ilyen folyadék az elektromos és/vagy a mágneses erőterrel is kölcsönhatásba léphet, így annak mozgása során elektromágneses hatásokat válthat ki. Ezek a hatások visszahatnak a folyadékokra, és mechanikai hatásokat okozhatnak. A magnetohidrodinamika a fémolvadékok áramlásában fontos szerepet játszik.

A MHD úton történő külső gerjesztés megoldható:

- Lüktető mágneses tér alkalmazásával (PMF) (Pulsating Magnetic Field)
- Haladó mágneses tér alkalmazásával (TMF) (Traveling Magnetic Field)
- Forgó mágneses tér alkalmazásával (RMF) (Rotating Magnetic Field)
- Ezek egymással, illetve állandó mágneses térrel, történő kombinációjával

Az értekezésem témáját RMF típusú, MHD keverő-berendezéssel ellátott kristályosító berendezés képezi, ezért az értekezésemben csak ezt a keverő-berendezés típust vizsgálom.

Munkám során az alábbi problémák megoldásával foglalkoztam:

- Sokoldalúan használható, irányított kristályosításra alkalmas, RMF típusú MHD keverővel egybeépített kristályosító berendezés kifejlesztése, melynek alkalmazási határai („technológiai ablaka”) a nemzetközi irodalomban ismertett berendezések paramétereit jelentősen meghaladja. Elérhető legyen vele a 150 mT, vagy annál nagyobb mágneses indukciójú forgó mágneses térben, és 10 K/mm hőmérséklet-gradiens közelében történő kristályosítás is.
- A forgó mágneses mezőt előállító induktor biztosítsa a kristályosítás ideje alatt, a kristályosítandó minta teljes térfogatában a beállított mágneses indukció állandóságát, hogy a fémolvadék térfogat egységére ható forgató nyomaték mindenütt állandó legyen. Ezáltal a kristályosodás alatt a fémolvadék fordulatszáma közel állandó lesz.
- A kifejlesztett berendezéssel a „technológiai ablak”-án belüli paraméterek az ismételt mérések esetén jól reprodukálhatók legyenek.
- A kristályosítandó, MHD úton kevert fémolvadék fordulatszámának és a forgó mágneses mező paramétereinek (mágneses indukció, frekvencia) kölcsönhatását meghatározó összefüggések kísérleti úton történő meghatározása.
- Különböző körülmények között kristályosított minták szövetszerkezetének kiértékelését segítő, a kristályosítandó fémolvadék, ötvözetolvadék áramlását jellemző hasonlósági kritérium meghatározása.

2. Az elvégzett kutatómunka rövid ismertetése

2.1 Tervezés és berendezés építés

A nemzetközi MICAST program keretében a 2000 évtől kezdve folytak irányított kristályosítási kísérletek különféle alumínium ötvözetekkel, a Miskolci Egyetemen az Anyagtudományi Intézet elődjében, a Fémteni Tanszékén. Az első időkben keverés nélkül, majd 2003-tól kezdődően RMF típusú mágneses keveréssel folytak kristályosítási kísérletek.

Az újonnan kifejlesztett berendezés ennek a berendezésnek a kiváltására készült, hogy lényegesen szélesebb alkalmazási lehetőséget biztosítson a kristályosítási kísérletek számára.

A tervezés 2005 harmadik negyedévében kezdődött. A tervezés és a kivitelezés lépésenként történt. A berendezés kivitelezésének első fázisa 2006 májusában fejeződött be. A jelenlegi formája a folyamatos fejlesztés következményeként 2008 januárjában alakult ki.

Kifejlesztett berendezés alkalmas a komplett kristályosítási feladat elvégzésére. (A szilárd halmazállapotú, kristályosítandó minta megolvasztására, majd az olvadt állapotú minta irányított kristályosítására, forgó mágneses térrel történő magnatohidrodinamikus keveréses, illetve keverés nélküli üzemmódban.)

Az új kristályosító berendezés fejlesztése során az RMF típusú MHD keverő tervezése és kivitelezése volt a legnagyobb kihívás. Olyan induktor megtervezése és kivitelezése volt a cél, amely üzemi paramétereiben és felépítésében is eltért az irodalomban publikált, hasonló célra épített berendezésektől. A hasonló célra épített berendezések a kristályosítandó mintában maximum. 25 mT mágneses indukció előállítására alkalmasak.

Az új induktor műszaki adatai:

Névleges feszültség: 3x1000 V

Névleges áram: 105 A

Frekvencia: 30-200 Hz

A kristályosítandó mintában (amely az induktor légrésében helyezkedik el) a maximális előállítható mágneses indukció: 300 mT

Póluspárszám: 1

Légrés mérete: Ø110x 300 mm

Hűtése: léghűtés és/vagy vízhűtés

Cos φ : ~0,02

Az induktort úgy kellett megtervezni, hogy a légrésében elférjen az ~1000 C° előállítására alkalmas, vízhűtéses külső köpennyel rendelkező olvasztó-kristályosító kemence.

Az induktor villamos tápegységét úgy alakítottam ki, hogy alkalmas legyen az MHD induktor forgó mágneses mezejének irányváltására. A tápegység vezérlésére elkészítettem egy programozható egységet, amellyel az

induktor programozott ki-be kapcsolgatását, illetve az induktor nyomatékának irányváltogatását lehet megoldani.

A kristályosító berendezésen túl tervezésre és kivitelezésre került egy, az MHD keverővel forgatott fémolvadék fordulatszámának mérésére alkalmas, nyomáskompenzációs elven működő fordulatszám-mérő berendezés is. Ezzel a berendezéssel $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál alacsonyabb hőmérsékletű fém- illetve ötvözetolvadékok fordulatszámát lehet MHD keverés közben mérni (pl.: Hg, Ga, GaIn, GaInSn ...).

2.2 A kifejlesztett berendezéseken végzett kísérletek és mérések

A kifejlesztett kristályosító berendezésen többféle ötvözzel végeztünk irányított kristályosítási kísérleteket. A kísérleteknél elsősorban alumínium ötvözeteket (ezek közül az AlSi7Mg0,6; AlSi7Fe1; AlCu4, AlNi6 ötvözeteket) használtunk, de végeztünk kísérleteket különböző ólomtartalmú ón ötvözetekkel, úgymint SnPb10; SnPb20; és SnPb30, is.

A kristályosítás alatt a kristályosítandó ötvözetolvadék teljes egészében azonos mágneses indukciójú forgó mágneses térrel volt keverve. Minden kristályosítási kísérletet más paraméterrel végeztük el. A mágneses indukció értéke egyes kísérleteknél 0mT, 3mT, 6mT, 10mT, 20mT, 30mT, 60mT, 90mT, 120mT, illetve 150mT volt.

Változtatni lehetett a mintamozgatási sebességet (v) is, mivel a kristályosítás közben mozgó talphűtést alkalmaztunk. Kísérleteket végeztünk különböző mágneses indukciónál 0,01mm/s, 0,02mm/s, 0,05mm/s, 0,1mm/s, 0,2mm/s, 0,4mm/s és 0,8mm/s mintamozgatási sebességgel.

A kísérleteknél a kialakult kezdeti hőmérséklet gradienst 1-14 K/mm közötti értékre lehetett beállítani.

Az elvégzett kristályosítási kísérletek során igen változatos szövetszerkezetek jöttek létre. A kristályosító üzemi paramétereinek megfelelő beállításával reprodukálni tudtuk az irodalmakban publikált szövetszerkezeteket, de egészen új, eddig nem publikált szövetszerkezeteket is sikerült előállítani.

Arra a kérdésre válaszolni, hogy kristályosítás során a kialakuló szövetszerkezetre milyen hatással van a mágneses keverés (az MHD keverő kivitele és az egyéb műszaki paramétere) csak az ötvözet olvadék mágneses térben történő viselkedésének ismeretében lehetséges. Ezért az olvadék fordulatszám és a mágneses tér jellemzők (mágneses indukció, frekvencia), valamint az olvadék-geometria közötti összefüggések meghatározása okán, kísérletsorozatokat folytattam.

A fémolvadék átlag fordulatszámának meghatározását több mérési módszerrel is elvégeztem, és arra a következésre jutottam, hogy erre a célra a leginkább megfelelő módszer a zárt mérőszondás, „sugár menti nyomáskülönbségek kompenzációjának” módszere.

A mérések körülményei:

A kísérleteknél felhasznált fémötvözet GaIn eutektikus ötvözet (75,5%Ga24,5%In) volt, melynek fizikai jellemzői a következők

• olvadáspontja	15,7	C°
• sűrűsége	6350	kg/m ³
• kinematikai viszkozitása	3,41 · 10 ⁻⁷	m ² /s
• fajlagos villamos vezetőképessége	3,58	MS/m
• relatív mágneses permeabilitás	1	

A mérések szobahőmérsékleten (22-25 C°) történtek.

A mérőszondák teflonból, kerámiából illetve, a mérőszonda belső felületi érdességének növelése céljából, csiszolóvászon bevonatú műanyagból készültek.

A mérőszondák belső átmérője d=10-35 mm közötti értékek voltak.

A nyugalomban lévő ötvözetre a behatolási mélység („ δ ”) 50 Hz esetén 37 mm, 150 Hz esetén 21,5 mm. A behatolási mélység értéke az olvadékhenger fordulatszámának növekedése során a növekedéssel arányosan növekszik.

A mérőszondában az olvadékoszlop magassága minden esetben L=60 mm volt.

2.3 A kísérletek kiértékelése

A mérések kiértékelésénél az alábbi összefüggéseket kerestem:

- A mágneses tér mágneses indukciója és a fémolvadék fordulatszáma közötti összefüggés adott frekvencia és adott geometria esetén.
- A mágneses tér frekvenciája és a fémolvadék fordulatszáma közötti összefüggés adott mágneses indukció és adott geometria esetén
- A fémolvadék-oszlop átmérője és a fémolvadék fordulatszáma közötti összefüggés adott mágneses indukció és adott frekvencia esetén
- A mintatartó falának befolyása a fémolvadék fordulatszámára

A kiértékeléseknél külön kitértem a d=10mm átmérőjű olvadékoszlopnál mért adatok vizsgálatára, mivel ez az átmérő közelíti meg legjobban a tervezett úrkísérletek során használatos geometriát.

3. Az új tudományos eredmények összefoglalása

A disszertációm célkitűzésében megfogalmazott feladatok elvégzése során elért eredményeim az alábbiakban foglalhatók össze:

1 Létrehoztam egy RMF típusú MHD keverővel ellátott kristályosító berendezést.

Kifejlesztettem a kristályosító kemencéhez geometriailag jól illeszkedő RMF típusú, MHD induktort. Az induktor légrésének térfogata egy 110 mm átmérőjű, 300 mm magas henger. Ebben a légrésben a jelenlegi tápegységgel 50 Hz frekvencián létrehozható 150 mT-s mágneses indukció. (Az induktor ennél erősebb mágneses tér létrehozására is alkalmas, akár 150 Hz-s frekvencia mellett is, ha megfelelő villamos tápegység rendelkezésre állna.)

Az új kristályosító berendezésnél a kristályosítandó minta teljes térfogatában változtatható a forgó mágneses tér mágneses indukciójának értéke, az irodalomban ez idáig nem publikált széles tartományban ($B = 0\text{--}150\text{ mT}$).

A kristályosító berendezéshez készítettem egy állandó és reprodukálható értékű hőelvonásra alkalmas, hálózati vizet használó hűtőberendezést is. Ez a hűtőberendezés hivatott hűteni a kristályosítás alatt a kristályosítandó mintát.

A hűtőberendezéssel a kristályosítás alatt elérhető induló hőmérséklet gradiens túllépi a 10 K/mm értéket.

2 A kristályosítási kísérletek üzembiztossá tétele, és a 10 K/mm feletti induló hőmérséklet gradiens elérése céljából kifejlesztettem egy kvarcüveg csőből és egy nem ferromágneses fém rúdból (ami a hűtőtönk feladatát látja el) összeépített mintatartó tokozatot. Ezzel biztosítható a hűtőtönkön keresztüli intenzív, egyirányú hőelvonás a kristályosítandó fémolvadékot tartalmazó kerámiatartóból, és így a fémolvadékból.

A kísérletek során sikerült megtalálni azt az olcsó és könnyen beszerezhető, lágy pasztaszerű anyagot, amely 700 °C-on is jó hőátadást biztosít a hűtőtönk és a kerámia tartó között.

3 Meghatároztam a hűtőtönk paramétereinek, valamint a vízhűtés paramétereinek hatását az átlagos hőmérséklet-gradiensre, adott minta leeresztési sebesség (a kristályosítás közbeni minta-mozgatás sebessége) esetére. Az elérhető hőmérséklet gradiens a leeresztési sebesség növelésével csökken.

4 Meghatároztam az MHD induktorból és a légrésébe helyezett fémolvadék mintából („fémolvadék-hengerből”) összeállt „tömör forgórészű aszinkronmotor” nyomaték-fordulatszám jelleggörbéjét adott tápfeszültség (adott mágneses indukció) és adott frekvencia esetére. A jelleggörbe egy negatív meredekségű egyenes.

5 Az MHD keverővel forgásba hozott „fémolvadék-henger” fordulatszámának mérésére három, különböző mérési módszert dolgoztam ki.

A három módszer közül a „Nyomáskompenzációs fordulatszámérő berendezés” bizonyult a legpontosabb, és a legjobb megoldásnak. Ez a berendezés alkalmas zárt térben forgó olvadék esetén, a sugár menti nyomáskülönbség kompenzációjával, az olvadék fordulatszámának és szögsebességének a sugár mentén történő meghatározására.

6 Megvizsgáltam a fémolvadék-henger fordulatszámát, a forgást létrehozó mágneses indukció függvényében. Megállapítható, hogy a 10 mm átmérőjű, 75,5%Ga24,5%In ötvözetolvadékot tartalmazó, teflon mintatartó „B-n” függvénye (i) 50 Hz esetén ~1600 ford/min fordulatszámig, (ii) 100 Hz esetén ~2800 ford/min fordulatszámig, (iii) 150 Hz esetén ~4000 ford/min fordulatszámig nagyon jó közelítéssel lineáris. Más olvadéknál, más anyagú és geometriájú mintatartó esetén is fennáll ez a megállapítás, de más a lineáris szakasz fordulatszám tartománya.

Megvizsgáltam a fémolvadék-henger fordulatszámát, a forgást létrehozó mágneses tér frekvenciájának függvényében. Megállapítható, hogy a 10 mm átmérőjű, 75,5%Ga24,5%In ötvözetolvadékot tartalmazó, teflon mintatartónál 150 Hz fölötti tartományban a fordulatszám a frekvencia növelésével, változatlan mágneses indukció mellett, alig növekszik.

Megvizsgáltam a fémolvadék-henger fordulatszámát a mintatartó átmérőjének függvényében. Megállapítható, hogy a 75,5%Ga24,5%In ötvözetolvadékot tartalmazó, teflon mintatartónál, azonos mágneses indukció és frekvencia mellett, a fordulatszám 25 mm átmérőig az átmérő növelésével kismértékben nő, 25 mm feletti átmérőnél az átmérő növekedésével csökken.

Megvizsgáltam a fémolvadék-henger fordulatszámát a mintatartó anyagának függvényében. Megállapítható, hogy a mintatartó anyaga és felületi érdessége, azonos átmérő, azonos mágneses indukció, azonos frekvencia mellett is befolyásolja a fordulatszámot. A felületi érdesség növelésével a fordulatszám csökken.

7 A kísérleti adatokból számítás útján meghatároztam a mintatartók „nyomatékigény-fordulatszám” függvényét. A vizsgált mintatartók „nyomatékigény-fordulatszám” függvénye felírható:

$$m_s = k n^c$$

alakban.

A „k” és „c” állandók a mintatartó anyagának, a felületi érdességének, és a belső átmérőjének, továbbá az olvadék viszkozitásának, és sűrűségének függvényei. Értékük a vizsgált mintatartóknál, és az 75,5%Ga24,5%In ötvözetolvadék esetében $k = 0,0004-0,0027$ $c = 1,58-1,86$ között változott.

A különböző mintatartókban lévő fémolvadék-henger „nyomatékigény-fordulatszám” függvényeiből, és az MHD keverő nyomaték-fordulatszám jelleggörbéiből meghatározható az MHD induktor légrésében előállított bármilyen mágneses indukció esetére (bármilyen induktor gerjesztés esetére) a „fémolvadék-henger” fordulatszáma, vagyis a „hajtás munkapontjának” helye.

8 A 75,5%Ga24,5%In ötvözetolvadékkal végzett kísérletek és mérések alapján megállapítottam, hogy az irodalomban a mágneses Taylor szám számítására hagyományosan használatos összefüggés

$$Ta_m = [\sigma B^2 R^4 \omega_0] / [2 \rho u^2]$$

az áramlások összehasonlítására csak korlátozott tartományban, $B < 17$ mT; $n < 250$ ford/min, alkalmas.

Ennél nagyobb mágneses indukció és fordulatszám esetében az áramlások összehasonlítására a Reynolds számot, vagy az általam levezetett pontosított mágneses Taylor számot célszerű használni, amely:

$$Ta_m^* = [\sigma B^2 R^4] [\omega_0 - \omega] / [2 \rho u^2].$$

Az összefüggésekben használt latin és görög szimbólumok jelentése:

m_s = nyomatékigény (súrlódási nyomaték)

ω_0 = a mágneses tér szinkron szögsebessége

n = az olvadékhenger átlag fordulatszáma

σ = az olvadék fajlagos vezetőképessége

B = mágneses indukció

R = az olvadékhenger sugara

ω = az olvadékhenger átlag szögsebessége

ρ = az olvadék sűrűsége

u = az olvadék kinematikai viszkozitása

4. Az új tudományos eredmények gyakorlati alkalmazhatósága

Az általam kifejlesztett, RMF típusú MHD keverővel ellátott kristályosító berendezést jelenleg is a MICAST –on kívül még kettő, pályázaton elnyert kutatási projekt használja.

A berendezéssel kristályosított minták, a jelen értekezés tárgyától eltérő, hamarosan védelemre kerülő, kettő darab PhD értekezés alapját képezik.

Ismereteink szerint a berendezés, paramétereinek köszönhetően, más laboratóriumokban megvalósíthatatlan kristályosítási kísérletek elvégzésére ad lehetőséget.

A „Nyomáskompenzációs fordulatszámérő berendezés” lehetőséget teremt a kristályosítások tervezéséhez segítséget adó „kisminta” kísérletek elvégzésére.

A fémolvadék-henger „nyomatékigény-fordulatszám” függvényének meghatározása és az MHD keverő nyomaték-fordulatszám jelleggörbéinek ismerete segítségével előre kiszámítható, hogy az RMF típusú MHD induktor légrésében előállított mágneses indukció (bármilyen induktor gerjesztés esetén) milyen fordulatszámra gyorsítja a „fémolvadék-hengert” azaz hol lesz a „munkapont” helye.

A pontosított mágneses Taylor szám alkalmazása segít a ~17 mT feletti mágneses indukciójú, RMF típusú MHD keverő használatával kristályosított mintadarabok szövetszerkezeteinek korrektebb összehasonlításánál.

A kísérleti eredményekből levont megállapítások felhasználhatók az iparban, a mágneses keverés közbeni folyamatos öntéseknél.

5. Summary

Nowadays the fast technological development requires cost-effective production of metals and metallic alloys having more and more specific characters than before. The large-scale and comprehensive basic- and applied research concerning the metals and metallic alloys is motivated by this requirement. An important field of research to metals and metallic alloys is the investigation of the solidification processes as well as their impact on these processes. Recently these investigations are performed not only in the usual environment but in the space laboratories too.

In the course of my research work, a solidification equipment having a magneto-hydrodynamic (MHD) stirrer of rotating magnetic field (RMF) type was developed for performing the solidification experiments on the ground.

The air gap of MHD inductor is a cylinder with a diameter of 110 mm and a height of 300 mm. This size of air gap provides the chance that the full volume of sample can be stirred during the solidification process. In this air gap a magnetic induction of 150 mT can be developed at a frequency of 50 Hz by means of the available power supply unit.

The heating system of solidification equipment ensures that the initial temperature gradient exceeds the value of 10 K/mm in the course of the solidification.

Three different methods were developed for measuring the revolution number of „metallic melt cylinder” rotated by the MHD stirrer.

The „Device measuring the revolution number by pressure compensation” proved to be the most precise and technically the best solution of the three methods. This equipment is suitable to measure the revolution number per minute (r.p.m) and angular velocity of melt along the radius while compensating the pressure difference along the radius during the rotating of a melt in a well-defined closed area.

Various revolution numbers of GaIn eutectic alloy stirred by means of the MHD stirrer in Teflon sample holders having different diameters at room temperature were measured.

The following conclusions were drawn during the evaluation of measurements performed by a 10 mm diameter of the alloy-melt:

- The „n-B” function is approximately linear (i) up to a revolution number of ~1600 rev/min in case of 50 Hz, (ii) up to a revolution number of ~2800 rev/min in case of 100 Hz, and (iii) up to a revolution number of ~4000 rev/min in case of 150 Hz.
- In the domain above 150 Hz, the revolution number barely increases by the increase of the frequency at a constant value of magnetic induction.

The evaluation of measurements performed at different diameters, it was found that - if the diameter exceeds 10 mm and the values of magnetic induction and frequency are constant - the revolution number increases to a small extent up to a diameter of 25 mm. The revolution number goes down at the diameters over than 25 mm.

In addition, it was also stated that at an identical diameter, identical magnetic induction and identical frequency, the revolution number is influenced by the material and the surface roughness of the sample holder. The revolution number decreases if the surface is getting more rough.

On the basis of the experiments while measuring the revolution number, it was stated that the function of „torque-requirement-revolution number” of the investigated sample holders can be described as follows:

$$m_s = k n^c$$

where „k” and „c” serve as constants and are the functions of the material, the surface roughness and the diameter of the sample holder as well as the functions of viscosity and density of melt. In case of the investigated sample holders, their values were ranging as $k = 0.0004-0.0027$; and $c = 1.58-1.86$.

At the measurement of the revolution number it was also stated that the relationship used traditionally for calculating the magnetic Taylor number in the references is suitable for comparing the flows only in a limited range when $B < 17$ mT; and $n < 250$ rev/min and presented as:

$$Ta_m = [\sigma B^2 R^4 \omega_0] / [2 \rho u^2]$$

It is reasonable to use the Reynolds number or the more exact magnetic Taylor number derived in the thesis as

$$Ta_m^* = [\sigma B^2 R^4] [\omega_0 - \omega] / [2 \rho u^2]$$

for comparing the flows in the case when the value of magnetic induction and the value of revolution number are higher than the above values.

The Greek and Latin letters serving as a shortlist to symbols used in the equations above are presented below:

m_s = torque-requirement (torque developed by friction)

ω_0 = synchronous angular velocity of magnetic induction

n = revolution number per minute (r.p.m.) of melt-cylinder

σ = specific conductivity of melt

B = magnetic induction

R = radius of melt-cylinder

ω = angular velocity of melt-cylinder

ρ = density of melt

u = kinematic viscosity

6. Publikációs jegyzék

Publikációk

1. A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: **Visualization of the Melt Flow under Rotating Magnetic Field**, *Materials Science Forum*, Ed: J. Gyulai and P. J. Szabó, Vols. 537-538, (2007), pp. 591-599, Trans Tech Publications, Switzerland, ISBN 0-87849-426-1, [IF= 0,399]
2. G. Gergely, Z. Gácsi, A. Rónaföldi, J. Kovács: **Effect of magnetic stirring on the microstructure of Al-Si alloys modified with strontium**, *MicroCAD 2007 International Scientific Conference*, 22-23 March, 2007, Section D: Material Science, and Materials Processing Technologies, Miskolc, Proceedings, Ed: L. Lehoczky., L. Kalmár., pp. 19-23, ISBN 978-963-661-745-5
3. A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: **Solidification facility equipped with a magnetohydrodynamic stirrer**, *MicroCAD 2007 International Scientific Conference*, 22-23 March, 2007, Section D: Material Science, and Materials Processing Technologies, Miskolc, Proceedings, Ed: L. Lehoczky., L. Kalmár, pp. 91-102, ISBN 978-963-661-745-5
4. J. Kovács, G. Gergely, Z. Gácsi, A. Roósz, A. Rónaföldi: **Quantitative Characterisation of Macrosegregation Produced by Forced Melt Flow**, *International Conference on Solidification Science and Processing, ICSSP III., Jaipur, India, 2006*, TP 2116, Transactions of the Indian Institute of Metals, An International Journal of Minerals, Metals and Materials Engineering, Special Issue on Solidification Science and Processing, Ed: Prof. B. S. Murty, Dr. S. Sen, Prof. D.M. Stefanescu, Vol. 60. Nos.2-3 April-June 2007, TIIMA 3 60(2-3) (69-365) 2007, pp. 149-153, ISSN. 0972-2815, [IF= 0,078]
5. A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: **Investigation and Visualisation of Melt Flow under Rotating Magnetic Field**, *International Conference on Solidification Science and Processing, ICSSP III., Jaipur, India, 2006*, TP 2127, Transactions of the Indian Institute of Metals, An International Journal of Minerals, Metals and Materials Engineering, Special Issue on Solidification Science and Processing, Ed: Prof. B. S. Murty, Dr. S. Sen, Prof. D.M. Stefanescu, Vol. 60. Nos.2-3 April-June 2007, TIIMA 3 60(2-3) (69-365) 2007, pp.213-218, ISSN. 0972-2815, [IF= 0,078]

6. *J. Kovács, A. Rónaföldi, G. Gergely, Z. Gácsi and A. Roósz: Characterization of the structure of Al-7Si-0.6Mg alloys solidified unidirectionally in a rotating magnetic field, Proceedings of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing (SP07), Sheffield, UK, 23-25 July, 2007, Ed: Howard Jones, pp. 405-411, ISBN-10: 0-9522507-4-8, ISBN-13: 978-0-9522507-4-6*
7. *Gergely Gréta, Roósz András, Kovács Jenő, Rónaföldi Arnold, Gácsi Zoltán: Mágneses keverés hatása az irányítottan kristályosított ötvözetek szövetszerkezetére, VIII. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Sepsiszentgyörgy, Románia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2006. április 6-9., 171-174. old., ISBN 973-7840-09-7*
8. *Gergely Gréta, Rónaföldi Arnold, Kovács Jenő, Dr. Gácsi Zoltán: Mágneses mezőben irányítottan kristályosított Sr-mal módosított Al-Si ötvözetek szövetszerkezetének jellemzése, IX. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Buziásfürdő, Románia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2007. március 29- április 1. 66-70 old., ISBN 973-7840-09-7*
9. *G. Gergely, Z. Gácsi, O. Bánhidi, J. Kovács, A. Rónaföldi: The Effect of a Rotating Magnetic Field on the Solidification of A356 Alloy Modified by Stroncium, Materials Science Forum, Vol.. 589, (2008), pp. 305-310, Trans Tech Publications, Switzerland, [IF= 0,399]*

Előadások

1. *A. Rónaföldi, J. Szabo: Magnyitogidrogynamicseszkije Naszoszü, Mehányika i Fizika Plazmü i Gazovik Potokov, Riga, Jurmala, SzSzSzR, 1981 december 15-18*
2. *A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: Visualization of the Melt Flow under Rotating Magnetic Field, V. Hungarian Conference and Exhibition on Materials Science, Testing and Informatics, Balatonfüred, Hungary, 2005. október 9-11.*
3. *J. Kovács, G. Gergely, Z. Gácsi, A. Roósz, A. Rónaföldi: Quantitative Characterisation of Macrosegregation Produced by Forced Melt Flow, oral, International Conference on Solidification Science and Processing, ICSSP III., Jaipur, India, 2006. november 19 – 23.*

4. *A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: Investigation and Visualisation of Melt Flow under Rotating Magnetic Field*, poster, *International Conference on Solidification Science and Processing, ICSSP III., Jaipur, India, 2006. november 19 – 23.*
5. *G. Gergely, Z. Gácsi, A. Rónaföldi, J. Kovács: Effect of magnetic stirring on the microstructure of Al-Si alloys modified with strontium*, *MicroCAD 2007 International Scientific Conference, 22-23 March, 2007, Section D: Material Science, and Materials Processing Technologies, Miskolc*
6. *A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: Solidification facility equipped with a magnetohydrodynamic stirrer*, *MicroCAD 2007 International Scientific Conference, 22-23 March, 2007, Section D: Material Science, and Materials Processing Technologies, Miskolc*
7. *J. Kovács, A. Rónaföldi, G. Gergely, Z. Gácsi and A. Roósz: Characterization of the structure of Al-7Si-0.6Mg alloys solidified unidirectionally in a rotating magnetic field*, *Proceedings of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing (SP07), Sheffield, UK, 23-25 July, 2007*
8. *A. Roósz, J. Kovács, A. Rónaföldi : Effect of a high rotating magnetic field induced melt flow on the macrosegregation in ternary aluminium alloy* *European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes, Nürnberg, Germany, 10-13 September 2007*
9. *Gergely Gréta, Roósz András, Kovács Jenő, Rónaföldi Arnold, Gácsi Zoltán: Mágneses keverés hatása az irányítottan kristályosított ötvözetek szövetszerkezetére*, *VIII. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Sepsiszentgyörgy, Románia, 2006. április 6-9.*
10. *Gergely Gréta, Rónaföldi Arnold, Kovács Jenő, Gácsi Zoltán: Mágneses mezőben irányítottan kristályosított Sr-mal módosított Al-Si ötvözetek szövetszerkezetének jellemzése*, *IX. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Buziásfürdő, Románia, 2007. március 29- április 1.*
11. *G. Gergely, Z. Gácsi, O. Bánhidi, J. Kovács, A. Rónaföldi: The Effect of a Rotating Magnetic Field on the Solidification of A356 Alloy Modified by Strontium* *6th. Hungarian Conference on Materials Science, , Siófok, Hungary, 2007. október 14-16*

12. J. Kovács, A. Rónaföldi, A. Roósz : **Effect of the high rotating magnetic field (min. 30 mT) on the unidirectionally solidified structure of Al7Si0.6 Mg alloy** *5th Solidification & Gravity 2008 Miskolc-Lillafüred, Hungary, 1-3 Sept. 2008*
13. O. Budenkova, A. Noeppel, J. Kovács, A. Rónaföldi, A. Roósz, Y. Fautrelle: **Comparison of the simulation and experimental result of the effect of RMF on directional solidification of Al-7%wt-Si alloy** *5th Solidification & Gravity 2008 Miskolc-Lillafüred, Hungary, 1-3 Sept. 2008*
14. J. Kovács, A. Rónaföldi, A. Roósz : **A new method for unidirectional solidification under rotating magnetic field in space experiments,** poster, *5th Solidification & Gravity 2008 Miskolc-Lillafüred, Hungary, 1-3 Sept. 2008*
15. A. Rónaföldi, J. Kovács, A. Roósz: **Revolution number (RPM) measurement of molten alloy by pressure compensation method,** poster, *5th Solidification & Gravity 2008 Miskolc-Lillafüred, Hungary, 1-3 Sept. 2008*
16. B. Rogozsán, J. Kovács, A. Rónaföldi, A. Roósz: **Influence of the rotating magnetic field on the secondary dendrite arm spacing in case of unidirectional solidification of Al7Si 1Fe alloy,** poster, *5th Solidification & Gravity 2008 Miskolc-Lillafüred, Hungary, 1-3 Sept. 2008*