

Alumíniumöntvények félfolyamatos öntése kísérleti kristályosító berendezéssel

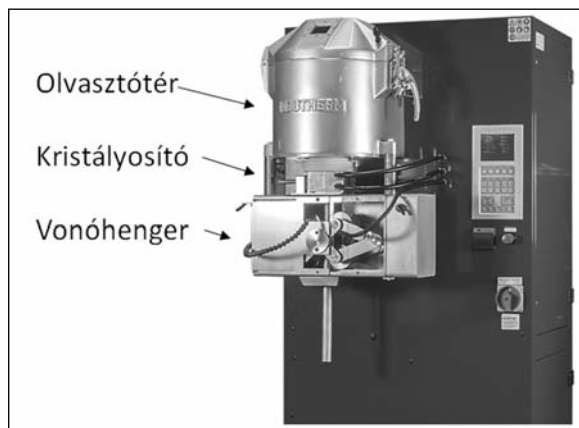
A Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézete az Arconic-Köfém Kft. gyártástechnológiájának fizikai szimulációját valósította meg. Ennek keretében üzembe helyezte és szisztematikus kísérletsorozat keretében optimalizálta az Indutherm CC3000 kísérleti félfolyamatos öntőmű működését. Ezzel a berendezés alkalmassá vált a különböző gyakorlati alumíniumöntvények kristályosításánál lejátszódó folyamatok vizsgálatára.

Bevezetés

A félfolyamatos öntés már a XIX. századtól ismert technológia, melyet elsősorban alumínium- és rézalapú ötvözetek öntésére használnak. Félfolyamatos öntéskor az olvadék a hőtartó kemencéből jó hővezetési tulajdonságokkal rendelkező, szabályozottan hűtött kristályosítóba jut, ahol a fém folyamatos kéregképződés mellett lefelé haladva szilárdul, miközben a kérgen belül még olvadék található. Kristályosodáskor a kialakuló szerkezetre – mely a csíráképződés és csíranövekedés folyamatából áll – nagy hatással van a hűlési sebesség. Ezek együttesen határozzák meg a szemcseszerkezet finomságát és ezáltal a mechanikai tulajdonságait is. A kristályosítás ötvözet- és méretspecifikus, ezért alaposan megtervezett öntéstechnológiai paraméterekkel célszerű végezni. A bemutatott kutatómunka célja a valós üzemi körülmények között történő gyártás optimalizálása és hibáinak kiküszöbölése fizikai szimulációkkal [1, 2].

A kísérleti öntőmű bemutatása

A Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézete részt vesz az Arconic-Köfém Kft. konzorciumi vezetésével az „Új, piacképes hengerelt alumíniumtermékek technológiájának fejlesztése, az anyagtudomány legújabb eredményei alapján...” elnevezésű projektben. A kutatás keretében beszereztük a színes- és nemesfémek félfolyamatos öntésére alkalmas Indutherm CC3000 berendezést. A kutatási programhoz



■ 1. ábra. Az Indutherm CC3000 félfolyamatos öntőmű felépítése

illeszkedve egy olyan kísérletsorozatot állítottunk össze és hajtottunk végre, mellyel az üzemi körülmények között történő félfolyamatos öntést laboratóriumi környezetben lehet szimulálni.

Az Indutherm CC3000 típusú kristályosító berendezéssel különböző méretű téglalap, illetve kör keresztmetszetű tuskók önthetők [3]. Az öntőmű a fő egységek bemutatásával az 1. ábrán látható.

Az öntőműben a fém olvasztása az olvasztótérben található grafittegelyben történik indukciós módon. Az olvadék feletti légtér vákuumozható, illetve védőgáz használatával inert atmoszféra hozható létre. Az olvasztótér további részei: az indukciós tekercs, a kerámia szigetelés, valamint a tuskóban és a tegelyfalban található hőelemek. Az olvasztótérről készült felvétel a 2. ábrán látható.

Az olvadék a grafittuskóval zárható tegelyből – 10 mm átmérőjű nyíláson keresztül – egy sárgaréz, négyzetes keresztmetszetű grafitkokillával bélelt kristályosítóba kerül. A pirométerrel ellátott kristályosító

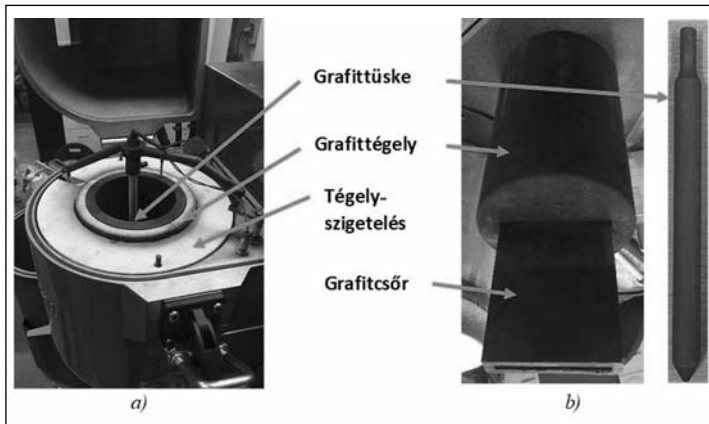
Kárpáti Viktor 2017-ben szerzett BSc anyagmérnök diplomát hőkezelési és képlékenyalakítási szakirányon a ME Műszaki Anyagtudományi Karán. Jelenleg MSc-hallgató és a Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet tanszéki mérnöke. Kutatási területe a képlékenyalakítás, kristályosodás, valamint a roncsolásmentes anyagvizsgálat.

Kazup Ágota BSc okleveles anyagmérnök, jelenleg másodéves MSc-hallgató és tanszéki mérnök a Műszaki Anyagtudományi Kar Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében. Kutatási területe az alumínium öntvények kristályosodása és metallográfiája (anyagvizsgálata).

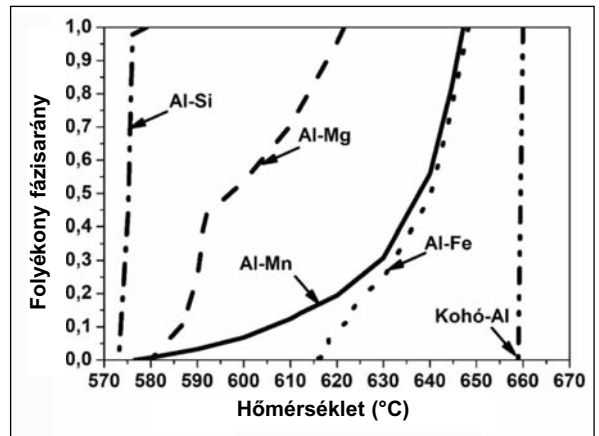
Hegedüs Balázs 2017-ben szerzett BSc anyagmérnök diplomát a ME Műszaki Anyagtudományi Karán. Jelenleg MSc-hallgató, és az Energia- és Minőségügyi Intézet tanszéki mérnöke. Kutatási területe a kristályosodás, hőtáadás és a salak-újrahasznosítás.

Ferenczi Tibor 1988-ban szerzett okleveles kohómérnök diplomát metallurgus szakon a miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen. Jelenleg a ME Műszaki Anyagtudományi Karán dolgozik mérnök-tanárként. A Metallurgiai és az Öntészeti Intézetek műhelylabor vezetője. Kutatási területe: pometallurgia, különleges hidrát és oxidtermékek, felülettisztítás, fémolvasztás.

Gácsi Zoltán szakmai életrajzát 2015/3. számunkban közzétettük.



■ 2. ábra. Az olvasztótér a) a kemencepáncélzat, benne a szigetelés és a grafittégellyel, b) a grafittégely, alján a belőle kifutó, kristályosítóba illeszkedő négyzetes grafittokillával (ipari elnevezéssel grafiticsőr), illetve a grafit záróelem (tüske)



■ 3. ábra. A Thermo-Calc szoftverrel számolt folyékony fázisarány hőmérséklet-függésének bemutatása a vizsgálni kívánt ötvözetek esetén

tó hőmérséklete vízhűtéssel automatikusan szabályozható 400–800 °C között a víz áramlási sebességével. A hűtőközeg hőmérséklete 22–50 °C között szabályozott. A dermedt fém a kristályosítóból egy acélból készült indítószál (vaktuskó) segítségével húzható ki.

A kristályosító egység alatt egymással szemben helyezkednek el a pneumatikusan záródó, bordázott felületű vonszolohengerek, melyeknek az indítószál és az öntött tuskó megtámasztása a feladata, valamint azok szabályozott eltávolítása. A vonszolás sebessége 0,1-9,9 mm/s között állítható. Az öntött szál öntés közbeni megállítása, és az ellenkező irányba történő visszatolása (reverzálása) is lehetséges. A vonóhengeres egységhez csatlakozik a szekunder hűtés, amellyel a további hőelvonás biztosítható.

Az öntés kezdetekor a vaktuskót az érme alakú bemunkált részével a vonszolohengereken keresztül felfelé helyezük be a grafittokillába. A tégelyben lévő tüske felemeléskor az olvadék befolyik a vaktuskóba bemunkált részbe, ami egy ún. vonószemet képez. Az öntés eredménye egy 10 × 100 mm keresztmetszetű hengerlési tuskó.

Fizikai szimulációk

Az Indutherm GmbH által gyártott öntőművet alumíniumkristályosításra még nem használták. Arra törekedtünk, hogy az Arconic-Köfém Kft.-ben alumíniumötvözetek (Al 99,5, Al-Si, Al-Fe, Al-Mg, Al-Mn) üzemi szinten leját-

szódó kristályosodási folyamatait valósítsuk meg a berendezéssel, ezt nevezzük fizikai szimulációnak.

A kutatómunkánk elején egy kísérleti tervet határoztunk meg, melynek első lépéseként az ötvözetek összetételét induktív csatolású plazma atomemissziós spektrometriával (ICP vizsgálattal) meghatároztuk. Az összetétel ismeretében a Thermo-Calc szoftver segítségével egy folyékony fázisarány mennyiséget számoltunk, amely hőmérsékletfüggését a 3. ábra mutatja. A Thermo-Calc egy olyan szoftver, amelynek segítségével termodinamikai és kinetikai számításokat tudunk elvégezni többkomponensű rendszerekben. Az egyensúlyszámítás alapkoncepciója az, hogy adott állapotváltozók (nyomás, hőmérséklet, összetétel) esetén meghatározzuk az egyensúlyi állapotot leíró paramétereket (fázisok száma és minősége, fázisarányok, fázisösszetételek) a rendszer Gibbs-energiájának minimalizálásával, azaz:

$$G_m = \sum_{\phi} y_{\phi} \cdot \sum_i x_{i(\phi)} \cdot G_{m,i(\phi)} \rightarrow \min$$

ahol G_m a rendszer moláris Gibbs-energiája (J/mol), F a fázisok száma, K a komponensek száma, y_{ϕ} a ϕ fázis fázisaránya, $x_{i(\phi)}$ az i komponens móltörtje a ϕ fázisban, $G_{m,i(\phi)}$ pedig az i komponens parciális Gibbs-energiája a ϕ fázisban [4].

Eddigi öntési kísérleteink során ötvözetlen alumíniumot (kohóalumínium) és 12,8% szilíciumtartalmú alumíniumötvözetet vizsgáltunk. A folyékony fázisarány diagram felhasználá-

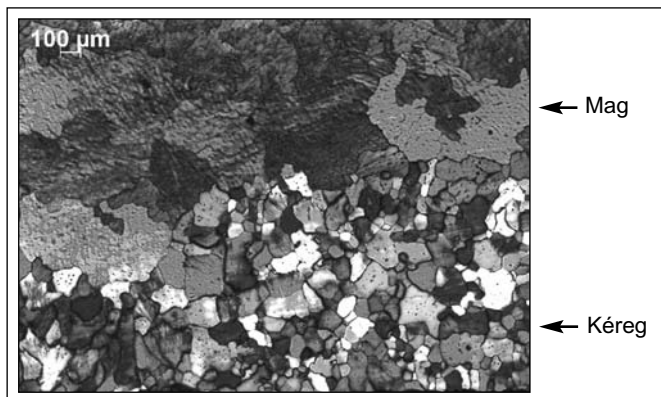
sával behatároltuk az öntési paramétereket (olvadék-hőmérséklet, kristályosító hőmérséklet, vonszolási sebesség) az említett két ötvözet esetében.

Kiinduló alapanyagként a kohóalumíniumot választottuk, mert jól önthető, melegen és hidegen egyaránt jól alakítható. Szennyezőanyag-tartalma 0,3–0,7% közötti, jellemző anyagminőségei az Al99,3%, Al99,5% és Al99,7%. Az ötvözetlen alumínium a fólia, illetve a vezetékgyártás alapanyaga, nagymértékű hidegalakítással 6-10 µm-es fóliavastagság is elérhető. A jó alakíthatóság feltétele a vas és szilícium mennyiségének megfelelő aránya (Fe/Si = 2,5), mivel ebben az esetben az alakíthatóságot csökkentő szilícium nem marad oldott állapotban, hanem kevésbé káros vegyület formájában kiválik. A tiszta alumínium szilárdágának, valamint korrózióállóságának növelése érdekében a gyártás során ötvözőket (Si, Cu, Mg, Zn) adagolnak hozzá [5].

A legjobb önthetőségi tulajdonságú alumíniumötvözet a szilumin. A szilíciumtartalomtól függően lehet hipoeutektikus (alumínium szilárdoldat és Al-Si eutektikum), eutektikus (Al-Si eutektikum) és hipereutektikus (primer Si és Al-Si eutektikum) összetételű. A fizikai szimuláció során hipoeutektikus ötvözetet öntöttünk. Az öntészeti sziluminötvözetet brazing alapanyagként is használják, ugyanis alacsony olvadáspontja miatt a többrétegű szerkezetek külső olvadó rétegét alkotja.

Az öntőmű felépítésének és működési elvének tanulmányozása után

öntési előkísérleteket végeztünk annak érdekében, hogy téglalap keresztmetű hengerlési tuskókat állítsunk elő. A kidolgozott kísérleti tervünk alapján végeztünk a kristályosítást. Modellezett eredmény alapján meghatároztuk a kohóalumínium befagyásának időszükségletét. Cikünkben a kísérleti tervvel összehangolt optimalizált öntési folyamatokat mutatjuk be kohóalumíniumra és sziluminötvözetre vonatkozóan.



■ 4. ábra. Az öntött kohóalumínium Barker-maratással előkészített, fénymikroszkóp alatt polarizált fényben látható szemcseszerkezetének vizsgálata: az öntvény kéregközeli része finomszemcsés, míg az öntvény magja durvaszemcsés

Az öntési paraméterek optimalizálása

Az öntési paraméterek optimalizálását kohóalumínium kristályosításával kezdtük és összesen 40 kísérletet végeztünk. A Thermo-Calc szoftverrel számolt diagramon látható, hogy a kohóalumínium dermedési hőköze ~ 1 °C-os érték, így ezt elhanyagolhatónak tekintjük.

Az első öntés során az öntődei gyakorlatban alkalmazott olvasztási hőmérsékletnek megfelelően az olvadékhőmérsékletet 720 °C-ra, valamint a kristályosítót a megfelelő hőelvonás érdekében 500 °C-ra állítottuk be. A kísérlet során az olvadék befagyott a grafitkokillának a hőtartó téglay és a kristályosító közötti szakaszába, mivel a kokilla hőmérséklete jóval a szilárdulási hőmérséklet alatt volt. Ennek a 60 mm hosszú kokillarésznek a hőmérsékletét csak közvetve tudjuk szabályozni az olvadék és kristályosító hőmérsékletének módosításával. Így a grafitkokillában lévő olvadék befagyásának későbbi elkerülése érdekében a kristályosító és az olvadék hőmérsékletét megemeltük. Növeltük az olvadék mennyiségét is a téglayben, mely a nagyobb metallosztatikai nyomás révén segítette az öntést.

A továbbiakban a kísérletet 600 °C-os kristályosító és 750 °C-os olvadékhőmérséklet mellett végeztük, ahol jellemzően melegfolyás és dendrites szakadás történt. Megállapítható, hogy az olvadék hőmérsékletét megemelve elkerülhető a befagyás. Következő lépésként a felületi hibák elkerülése céljából szükségesnek ítéltük

az öntési hőmérséklet további emelését, valamint a vonszolási sebesség növelését is – a minimális dermedési hőköz miatt –, mely paramétereket öntés közben változtattuk, és figyeltük azok hatását a felületi minőségre.

Az utolsó optimalizációs kísérletet 850 °C-os olvadék-hőmérséklettel indítottuk, a megfelelő kiindulási kokilla-hőmérséklet biztosítása miatt. Abban az esetben, ha a grafitkokilla túlhevülne, jellemzően 680 °C fölé, az olvadék kifolyásának elkerülése érdekében szekunder hűtést alkalmaztunk. A túlhevülés megakadályozására a kristályosító hőmérsékletét is csökkentettük – az öntések alkalmával – 600 °C-ról 450 °C-ra, a megfelelő hőelvonás biztosítása érdekében. A kísérlet végén a vonszolási sebességet a gép által elérhető maximális értéken tartottuk. Emellett maximális szekunder hűtést alkalmaztunk, mely paraméterek együttesen eredményezték a legjobb öntvényfelületet. A kísérlet következményeként megállapítható, hogy a felületi minőség szempontjából a vonszolási sebesség és a szekunder hűtés a legfontosabb laboratóriumi technológiai paraméter, így ezt a paraméteregyüttest optimalizálnak tekintjük.

Kohóalumínium kristályosítása

A kristályosítást a már optimalizált paraméterekkel indítottuk. A kísérlet során a grafitkokilla maximális hőmérséklete 680 °C volt, ezért a szekunder hűtést nem kapcsoltuk be. Az előző kísérletek alapján az öntést 0,1 mm/s vonszolási sebességgel indítottuk, melynek célja a korábban tapasztalt

szálandítási nehézségek – mint a grafitkokillába történő befagyás és szálszakadás – kiküszöbölése volt. A kísérlet során magasabb, 0,4 mm/s vonszolási sebességet állítottunk be, így megfelelő felületi minőséget értünk el. Megjegyzendő, hogy öntés közben a grafitkokilla hőmérséklete (680 °C) elérte és túllépte a vizsgált ötvözet olvadáspontját. Az öntött tuskó Barker-maratással előkészített, fénymikroszkópos felvételét a 4. ábra mutatja

be. Szekunder hűtés alkalmazása nélkül a mag hűlése sokkal lassabb volt, mint a kéregé, ezért az öntvény kérge finom-, míg a magja durvaszemcsés lett.

A vizsgált technológiai paraméterekkel a kristályosítást többször megismételtük. A megfelelő felületi minőséget reprodukálni tudtuk, így az adott paraméterbeállításokkal történő előállítás üzembiztosnak tekinthető.

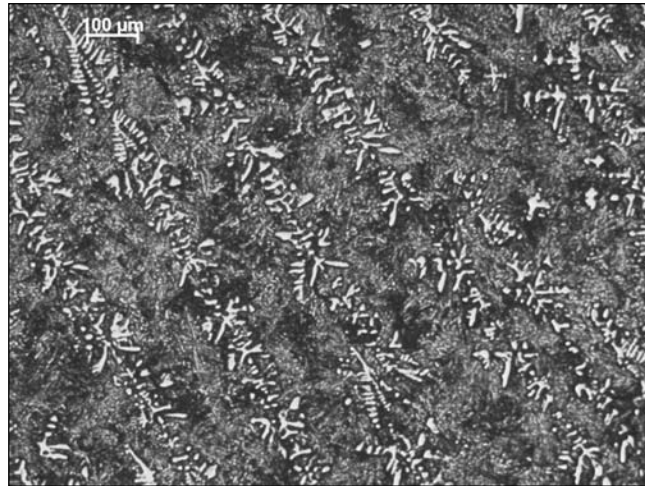
Az olvadék hőmérsékletét 830 °C-ra csökkentettük az ipari gyakorlat jobb közelítése miatt. Ezen kísérletek esetén is megfelelő öntvényminőséget értünk el.

Hipoeutektikus sziluminötvözet kristályosítása

A 3. ábra szerint az ötvözet olvadáspontja 580 °C, valamint dermedési hőköze 8 °C. A dermedési hőköz értéke – mint a kohóalumínium esetében is – minimális, így a kohóalumínium kristályosításánál szerzett tapasztalatok és a Thermo-Calc szoftverrel számolt értékek alapján 770 °C-os olvadék és 450 °C-os kristályosító hőmérsékletet állítottunk be. Szálandításnál a vonszolási sebességet minimális értéken tartottuk, majd a szálkilépés után jelentősen növeltük. Öntés közben a grafitkokilla hőmérsékletét szekunder hűtéssel 30 °C-os pontossággal tudtuk szabályozni. Az öntés során megállapítottuk, hogy a felület minősége akkor ideális, ha a kokilla hőmérséklete a fém olvadáspontja felett van minimum 20 °C-kal. Ezen kísérlet esetén is kiváló öntvényminőséget értünk el. Az 5. ábra az öntött tuskó Barker-maratással előkészített fénymikroszkópos fel-



a)



b)

■ **5. ábra.** Az öntött sziluminötvözet Barker-maratással előkészített, fénymikroszkóp alatt polarizált fényben látható dendrites szemcseszerkezete: a) az öntvény kérge durvaszemcsés és b) az öntvény magja finomszemcsés

vételét mutatja be, melyen látható, hogy az öntvény kérge durvább szemcseszerkezetű, mint az öntvény magja. A jelenség azzal magyarázható, hogy a kéreg 450 °C-on lassan szilárdult meg, míg a mag a 22 °C-os szekunder vízűtés miatt jóval gyorsabban kristályosodott.

Összefoglalás

Kutatómunkánk célja az Arconic-Köfém Kft.-ben történő öntés fizikai szimulációja volt. A fizikai szimuláció során végrehajtott kísérletsorozat eredményeinek kiértékelése során meghatároztuk azokat az optimum paramétereket, melyekkel a kohóaluminium és a szilumin öntése a kísérleti berendezéssel megvalósítható. A fentiek mellett az eredménynek jelentőségét az is adja, hogy a kísérleti berendezés gyártójának tájékoztatása szerint ezzel megvalósítottuk a kristályosító berendezés egy új célú, alumíniumöntésre történő felhasználását.

A kísérletsorozat során az alábbi megállapításokat tettük:

1.) A Thermo-Calc szoftverrel végzett számítások és az elvégzett kísérletek alapján meghatároztunk egy-egy optimális paraméteregyüttest kohóaluminium és szilumin esetében.

2.) Az eredményes öntés érdeké-

ben az egyik szélsőséges esetben a grafitkokillába történő befagyást, míg a másik szélsőséges esetben a csak részben megszilárdult szál okozta melegfolyást és szálszakadást kell elkerülni.

3.) Az öntés akkor sikeres, ha a grafitkokilla hőmérséklete 20 °C-kal van az ötvözet olvadáspontja felett.

4.) Nagyobb olvadék-hőmérséklet-hoz a megfelelő hőelvonás biztosítása érdekében kisebb kristályosító hőmérséklet tartozik.

5.) A felületi hibák elkerülése érdekében 0,4 mm/s vonszolási sebességet kell alkalmazni.

6.) Nagyobb vonszolási sebesség esetén az olvadék túlfolyása elkerülhető a vonszolás szüneteltetésével, valamint szekunder hűtéssel.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a Thermo-Calc szoftverrel végzett számításokban elvégzett segítségért Végh Ádám kollégánknak, az ICP vizsgálatokért dr. Bánhidi Olivérnek.

A cikkben ismertetett kutatómunka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt

részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

A kutatómunka az „Új, piacképes hengerelt alumínium termékek technológiájának fejlesztése, az anyagtudomány legújabb eredményei alapján...” elnevezésű GINOP kutatási projektben valósult meg.

Irodalom

- [1] Dmitry G. Eskin: Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminium Alloys, 2008
- [2] K. T. Akhil, Sanjivi Arul, R. Sellamuthu: The effect of section size on cooling rate, microstructure and mechanical properties of A356 aluminium alloy in casting, Procedia Materials Science 5 (2014) 362–368.
- [3] Blue Power Casting System - www.bluepower-casting.com, 2018
- [4] Dr. Kaptay György: Anyagegyensúlyok makro-, mikro- és nanoméretű rendszerekben, Miskolc, 2011
- [5] Ricardo Branco, Filippo Berto, Andrei Kotousov: Special Issue on „Mechanical Behaviour of Aluminium Alloys”, 2018