

**2. táblázat.** A vizsgált ötvözetek termikus elemzéséhez tartozó mért és számított adatok

Minősítő	AlSi7Mg	AlSi7Mg+Ti	AlSi9Cu1	AlSi9Cu1+Ti	AlSi9Cu3	AlSi9Cu3+Ti
$T_{LU}$ °C	612,3	615,6	590,1	595,9	586,9	587,9
$\Delta T_{LR-T_{LU}}$ °C	1,31	0,00	0,88	0,00	3,15	2,65
KF16 [9] °C	3,50	9,47	4,06	6,87	6,66	11,21
KF16 [10] °C	2,74	7,58	3,94	5,23	6,79	11,38
$t_1$ [3] s	7,0	0,0	12,0	0,0	14,0	7,0
$t_4$ [9] s	18,5	0,0	24,0	0,0	34,0	21,7
$t_5$ [9] s	16,0	0,0	21,5	0,0	31,2	18,9

összehasonlítását. A vizsgálatok igazolják, hogy a szemcsefinomítottság minősítése több paraméter együttes figyelembe vételével ad megbízható eredményt.

Az üzemi gyakorlatban a felhasznált betétanyag változtatása, a nagy visszatérő hulladékarány, vagy selejtöntvényekből történő olvasztás, a hosszú idejű hőn tartás az olvadék primer kristályosodásánál a csíraállapot megváltozását idézi elő a Ti-tartalmú csíráképző vegyületszemcsék durvulása miatt. Ezek hatása a primer kristályosodásra csak termikus elemzéssel mutatható ki.

A vizsgálati eredmények igazolják a 0,75 kg/tonna mennyiségű szemcsefinomító AlTi5B1 segédötvtözet alkalmazásának kedvező hatását olyan olvadékok esetében is, melyek az üzemi előírások szerinti titántartalomra vonatkozó követelményeknek megfelelnek.

### Köszönetnyilvánítás

A közlemény az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 számú, a „Fiatalodó és megújuló Egyetem – Innovációs

területi központ a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” című projekt részeként valósult meg

### Irodalom

[1] D. M. Stefanescu: Thermal Analysis-Theory and Applications in Metalcasting. In: International Journal of Metalcasting, Vol. 9. No. 1., 2015. pp. 7–22.

[2] M. Djurdjevic, I. Vicario, G. Huber: Review of Thermal Analysis Applications in Aluminium Casting Plants. In: Revista de Metallurgia, Vol. 50. No. 1., 2014. pp. 1–12.

[3] J. A. Spittle: Grain refinement in shape casting of aluminium alloys. International Journal of Cast Metals Research, Vol. 19., No. 4., 2006. pp. 210–222.

[4] F. C. Robles-Hernandez, J. M. H. Ramirez, R. Mackay: Al-Si Alloys – Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications. Springer International Publishing AG, 2017. pp. 17–33, 209–213.. ISBN 978-3-319-58380-8

[5] G. K. Sigworth, T. A. Kuhn: Grain refinement of aluminum casting alloys. International Journal of Metalcasting, Vol. 1. Issue 1, 2007. pp. 31–40. doi: 10.1007/BF03355416

[6] B. S. Murty, S. A. Kori, M. Chakra-

borty: Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying. International Materials Reviews, Vol. 47(1), 2002. pp. 3–29. doi:10.1179/095066001225001049

[7] J. Charbonnier: Microprocessor assisted thermal analysis testing of aluminum alloy structures. AFS Transactions, Vol. 92., 1984. p. 907

[8] F. Bekaert, E. Wettinck: Study of the grain refinement of A 356 and its control by thermal analysis. Aluminium, Vol. 72., No. 6., 1996. pp. 442–447.

[9] W. Khalifa: Thermal Analysis of Grain Refining in A319 Alloys. In: Light Metals 2017, Edited by A. P. Ratvik, TMS, 2017. pp. 1027–1034.

[10] W. Menk, M. O. Speidel, R. Döpp: Die thermische Analyse in der Praxis der Aluminiumgießerei. Giesserei, Bd. 79, Heft 4 (1992), 125–134.

[11] L. Bäckerud, G. C. Chai, J. Tamminen: Solidification Characteristics of Aluminum Alloys. AFS/Skanaluminium, Stockholm, 1990. p. 256.

[12] R. Guan, D. Tie: A Review on Grain Refinement of Aluminum Alloys: Progresses, Challenges and Prospects. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Online First Article, 2017. doi:10.1007/s40195-017-0565-8

[13] E. Ghassemali, M. Riestra, T. Bogdanoff, B. S. Kumar, S. Seifeddine: Hall–Petch equation in a hypoeutectic Al-Si cast alloy: Grain size vs. secondary dendrite arm spacing. Procedia Engineering, Vol. 207, 2017. pp. 19–24. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.731

[14] J. Fred Major: Aluminum and Aluminum Alloy Castings. In: ASM Handbook, Volume 15: Casting, ASM International, 2008. pp. 1059–1084.

[15] G. K. Sigworth: Understanding Quality in Aluminum Castings. AFS Transactions, Vol. 119. 2011. pp. 211–227.

WALCZER CSÁBA – BÁRDOS ANDRÁS

# Nyomásos rotoröntvény formatöltési idejének optimalizálása

**Napjainkban jelentősen megnőtt az igény az elektromos meghajtású gépjárművek iránt. Ezért egyre több nyomásos öntéssel előállított rotoröntvényre van szükség. A rotoröntvények öntéséhez először az öntvény öntési idejét kell meghatározni. A rotoröntvények öntési idejének meghatározásához a hagyományos öntvények esetében alkalmazott számítási metódus nem alkalmazható. A cikkünkben bemutatjuk milyen módon számolható ki egy adott rotoröntvény öntési ideje, amit kísérleti öntések eredményeivel is igazolunk.**

A légszennyezés egyik fő forrása a közlekedés, ami a városokban élők életminőségére jelentősen kihat. Az egészségre káros anyagok döntő többsége a belsőégésű motorok égéstermékéből származik, melynek csökkentése illetve

tisztítása a jelenleg ismert technológiákkal gazdaságosan már nem oldható meg. Az emissziómentes, környezetsemleges közlekedés kialakítása a cél, amihez jó lehetőséget kínálnak az elektromos meghajtású gépjárművek. Ezekben a hajtáslánc fő egysége a villamos motor, amelyek közül az indukciós motor forgórészének kalickáját nyomásos öntéssel gyártják. Ez a technológia kielégíti a járműipar támasztotta minőségi és gazdaságossági igényeket. Az indukciós motorok felhasználási területe szerteágazó, mint például ipari motorok, szivattyúk stb. és az alkalmazott gyártási technológia, hasonlóan a járműiparhoz, itt is nyomásos öntés. Ezek forgórészeire jellemző a kisebb számú (< 40), de a szélesebb (> 2 mm) horonykialakítás. Ezzel szemben az elektromos autók forgórészeiben nagyobb (> 56) és keskenyebb (< 2 mm) horonyokat találunk, ami merőben megváltoztatja a kalicka önthetőségét, ezáltal a gyárthatóságát.

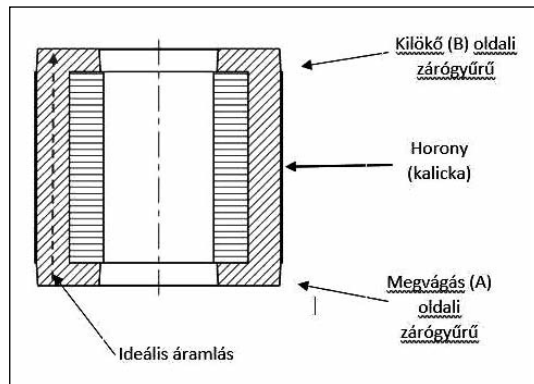
Az ipari motorok kezdeti forrasztásos gyártástechnológiáját [1] folyamatosan az öntés váltotta fel, amit a múlt század '30-as éveitől kezdve kezdtek fejleszteni és szabadalmaztatni. Ezek az ötletek nem kínáltak megoldást az autóiparban használatos rotorok gyártásánál tapasztalható kihívásokra.

A nyomásos öntéssel gyártott rotoröntvények, azaz kalickák alapanyagának kiválasztásakor a következő mértékadó tulajdonságokat veszik figyelembe:

- elektromos vezetőképesség,
- önthetőség,
- szakítószilárdság,
- folyáshatár.

Mint minden öntvény esetében, a forgórészek nyomásos öntésénél is az első feladat az öntési idő meghatározása, ahol a következő tényezőket kell figyelembe vennünk:

- 1) a forma hőelvonó képességét, ami függ a kiindulási hőmérséklettől, a



■ 1. ábra. A forgórész részei és a fém áramlása öntés során

hővezetési tényezőtől, a fajhőtől és a sűrűségtől;

- 2) a szírfém vagy ötvözet termikus tulajdonságait (öntési hőmérséklet, szolidushőmérséklet, látenshő, fajhő, sűrűség stb.);

- 3) az öntvény redukált falvastagságát.

A redukált falvastagság meghatározása egyszerű geometriák esetében könnyen megoldható feladat. Az öntvény térfogatát – amely az elvonandó hőt tárolja – elosztjuk az öntvény felületével amin keresztül a hőleadás történik.

A rotoröntvények esetében ez a számítási módszer már nem alkalmazható, hiszen az öntvény, azaz a kalicka különböző geometriájú részekből épül fel: zárógyűrű, hornyok (1. ábra).

A dermedési folyamat megértéséhez először a fém forgórészen belüli áramlását kell megismerni.

Az 1. ábrán látható, hogy ideális fémáram esetében először a megvágás (A) oldali, vastagfalú zárógyűrű töltődik fel, majd a vékonyfalú hornyok és végül a kilőkő (B) oldali ismét vastagfalú zárógyűrű. Az ilyen, visszátóltségmentes ideális áramlással csökkenthető az öntvényen belüli levegő-bezáródás kilakulásának valószínűsége. Az öntési idő szempontjából a három különböző geometriájú öntvényrészt kell megvizsgálunk.

A redukált falvastagság, más néven a modul meghatározásához a következő részek vizsgálandók:

- zárógyűrű (A), (B) oldalak,
- horony (kalicka).

A következőkben egy adott rotoröntvényen keresztül a mutatjuk be a tényleges számítási metódust.

#### Zárógyűrű:

Mivel a két zárógyűrű geometriája ebben a példában megegyezik egymással, ezért a modult csak egyszer kell kiszámítani.

Zárógyűrű felülete: 346 mm<sup>2</sup>.

Az adott rész a 2. ábrán látható.

Zárógyűrű kerülete: 75,2 mm

Modul:

$$M_{\text{zárógyűrű}} = \frac{A_{\text{zárógyűrű}}}{K_{\text{zárógyűrű}}} = \frac{346 \text{ mm}^2}{75,2 \text{ mm}} = 4,6 \text{ mm}$$

ahol [1.1]

$A_{\text{zárógyűrű}}$  – a zárógyűrű metszetének felülete (mm<sup>2</sup>),

$K_{\text{zárógyűrű}}$  – a zárógyűrű metszetének kerülete (mm),

$M_{\text{zárógyűrű}}$  – a zárógyűrű modulja (mm)

#### Horony:

Horony felülete: 72,198 mm<sup>2</sup>. Az adott rész a 3. ábrán látható.

Horony kerülete: 49,8 mm

$$M_{\text{kalicka}} = \frac{A_{\text{kalicka}}}{L_{\text{kalicka}}} = \frac{72,2 \text{ mm}^2}{22,2} = 1,44 \text{ mm}$$

ahol [1.2]

$A_{\text{kalicka}}$  – a kalicka metszetének felülete (mm<sup>2</sup>),

$K_{\text{kalicka}}$  – a kalicka metszetének kerülete (mm),

$M_{\text{kalicka}}$  – a kalicka modulja (mm).

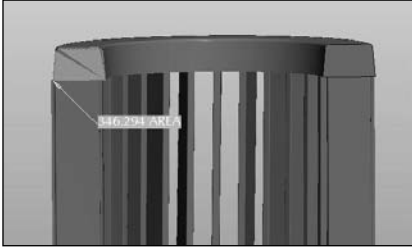
A számításokból látható, a horonynál lévő redukált falvastagság jóval kisebb, mint a zárógyűrű esetében, ezért öntés illetve dermedés szempontjából ez a rész lesz a mértékadó [2].

Mivel a felület/kerület hányados a rotoröntvények esetében kisebb modult eredményez, mint a horony falvastagságának fele, ezért ez a számítási eljárás ennél a termékcsoporthal nem alkalmazható (4. ábra).

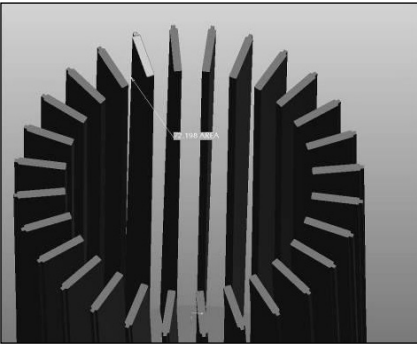
Az imént ismertetett hiba kiküszöbölésének céljából vezessünk be egy új redukált falvastagsági számítást, melynek lényege, hogy a horony felületét osztjuk a horony teljes hosszával [3].

**Walczar Csaba** 2002-ben végzett a Budapesti Műszaki Egyetemen okleveles gépészmérnökként, majd 2010-ben a Miskolci Egyetemen MSc-kohómérnökként. A Kerpely Antal Doktori Iskola PhD-hallgatója. Jelenleg a Breuckmann Hungary Kft. műszaki igazgatója.

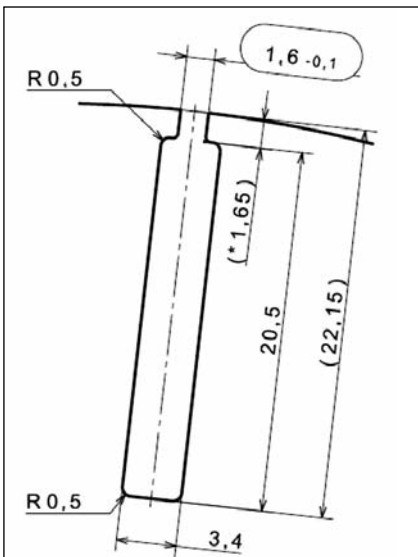
**Dr. Bárdos András** 2002-ben végzett a Budapesti Műszaki Egyetemen okleveles gépészmérnökként, majd ugyanitt 2006-ban PhD-fokozatot szerzett. A Stuttgarter DHBW és a Miskolci Egyetem docense. A Dr. Bardos Consulting tulajdonosa.



■ 2. ábra. A zárógyűrű felülete [2]



■ 3. ábra. A kalicka egy hornyának felülete [2]



■ 4. ábra. A horony méretei [2]

$$R_{slot} = \frac{A_{kalicka}}{K_{kalicka}} = \frac{72,2}{49,8} = 3,3 \text{ mm}$$

ahol

$R_{slot}$  – a kalicka redukált falvastagsága (mm),

$A_{kalicka}$  – a kalicka metszetének felülete (mm<sup>2</sup>),

$L_{kalicka}$  – a kalicka hossza (mm).

A választott redukált falvastagság tehát:  $R_{slot} = 3 \text{ mm}$

A fenti számítás alkalmazható bármely más horonygeometria esetében is (5. ábra).

Az öntési idő számításánál a hőel-

vonást a lemezcsonagra vonatkozóan kell meghatározni. Ugyanis ha a formatöltés, azaz a lemezcsonag hornyainak töltése közben az olvadék részben vagy egészben megszilárdul, a megvágással szembeni zárógyűrű kitöltése ezzel a megvágási elrendezéssel nem biztosítható.

A dermedési idő meghatározása [2] alapján:

$$t_{solid} = \left( \frac{\sqrt{\pi} \cdot \rho_{copper} T \cdot (L_s + c_{copper} \cdot \Delta T)}{2 \cdot b_{stack} \cdot (T_{const.stack} - T_{stack})} \right) \cdot R_{slot}^2$$

ahol

$\rho_{copper} T$  – az olvadt réz sűrűsége adott hőmérsékleten (g/mm<sup>3</sup>)

$L_s$  – látenshő (J/kg)

$c_{copper}$  – az olvadt réz fajhője (J/kg\*K)

$\Delta T$  – az öntési és a megszilárdulási hőmérséklet-különbség (°C)

$b_{stack}$  – a lemezcsonag (vasmag) hőelvonó képessége (kg/s<sup>5/2</sup>\*K)

$T_{const.stack}$  – a lemezcsonag nútja olvadt fémmel érintkező felületének konstans hőmérséklete (°C)

$T_{stack}$  – a lemezcsonag kiindulási hőmérséklete (°C)

A fenti összefüggés szerint a lemezcsonag kiindulási hőmérséklete jelentősen befolyásolja az öntési időt (6. ábra). A Bennett–Pokorny-diagram és minden olyan számítási eljárás, ahol a betétanyag, tehát a lemezcsonag hőmérséklete nincs figyelembe véve, nem alkalmazható a rotoröntvények pontos öntési idejének kiszámításához. A fenti példában ismertetett rotor horonygeometria esetében a 100 °C-os lemezcsonag kiindulási hőmérséklete a dermedési időt közel-

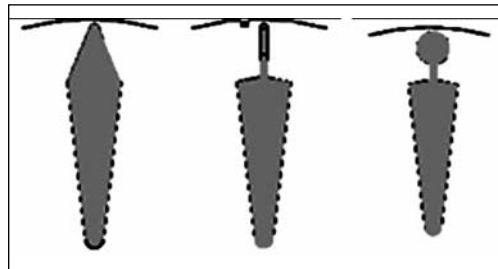
tőleg 30 ms-mal megnöveli. Mivel a kilökő oldali zárógyűrű táplálása és töltése a hornyokon keresztül történik, ami mellesleg a vasmagban, azaz a lemezcsonagban található, és ez az a rész, amely az öntési idő szempontjából meghatározó, ezért a lemezcsonag hőmérsékletének figyelembe vétele, különösen szűk horonygeometriák esetében elengedhetetlen.

A lemezcsonag előmelegítésével tömörebb kalicka önthető. A nagyobb öntési idő hatására a hornyokban a fém áramlási sebessége csökkenthető, ami jobb kitöltést eredményez, hiszen csökken az esetleges levegőbezárodás kialakulásának esélye, továbbá a töltés közben a hornyok felületén megszilárduló fém mennyisége is kisebb lesz. Összegezve, a lassabb fémáramlás elősegíti az egyenletes horonykitöltést (7. ábra).

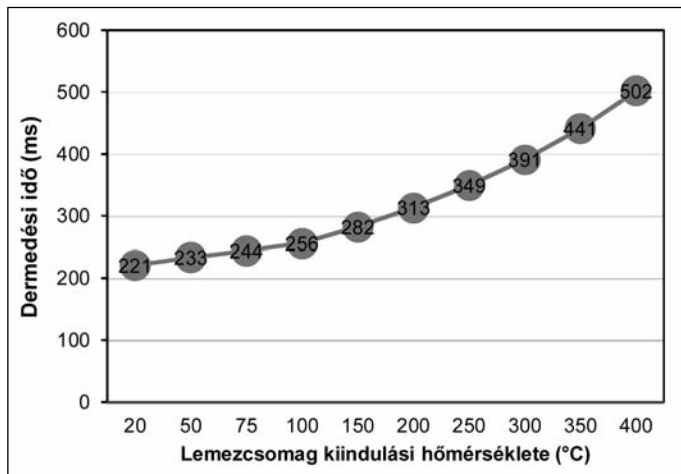
A lemezcsonag kiindulási hőmérséklete nem növelhető korlátlanul. A mérsékelt előmelegített vasmag esetében a zsugorodási üregek a zárógyűrű közepén alakulnak ki, és elkerülik a nútok és a zárógyűrű érintkezési zónáját, ami a villamos vezetőképesség, azaz az állandó villamos vezető keresztmetszet miatt fontos. A 400 °C hőmérsékletre előmelegített vasmag alkalmazása esetében zárógyűrű és a nút érintkezési zónájában zsugorodási üregek keletkeznek, hiszen ez a terület az előmelegítés miatt nagyobb hőmérsékletű, így itt a megszilárdulás lassabb, ami csökkenti a két rész közötti érintkezési vezető keresztmetszetet. Ez a keresztmetszet-csökkenés működés során túlmelegedhet és a mechanikai terhelhetőséget is rontja [6] (8. ábra).

A korábbi számítások és feltevések igazolása kísérleti úton történt, ahol a lemezcsonag kiindulási hőmérséklete 20 °C volt. A következő lépésben az öntési idő meghatározása volt szükséges. A hidegfolyás elkerülése érdekében az öntési idő a dermedési idő egytizede, azaz  $t_{casting} = 22 \text{ ms}$ .

12 különböző beállítással közel 100 öntvényt gyártottunk le. A paraméterek megválasztásánál az öntési időt 15 és 75 ms között változtattuk. A termékek minősítése a rotorban lévő réz súlya alapján történt úgy, hogy a minimális súlyha-



■ 5. ábra. Különböző horonygeometriák [4]



■ 6. ábra. A lemezcsomag kiindulási hőmérsékletének hatása a dermedési időre

tár 6955 g volt, aminek meghatározásában a termék 3D-s modellje nyújtott alapot. Az alkalmazott öntési idő ellenőrzése, az öntőgépen rögzített öntési paraméterek (dugattyúsebesség, dugattyúelmozdulás) alapján történt. Az alkalmazott öntési időt az öntőkamra keresztmetszete és az alkalmazott öntődugattyú második fázisbeli sebessége alapján számíthatjuk ki:

$$t_{\text{önt}} = \frac{V_{\text{rotor}}}{A_{\text{kamra}} \cdot v_2}$$

$V_{\text{rotor}}$  – a rotor térfogata (m<sup>3</sup>)

$A_{\text{kamra}}$  – a kamra keresztmetszete (m<sup>2</sup>)

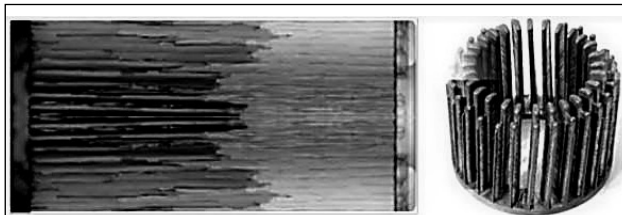
$v_2$  – öntődugattyú sebessége a

22 ms öntési időhöz tartozó öntési paraméterekkel voltak gyárthatók.

A fentiekben ismertetett számítások bebizonyították, hogy rotoröntvények esetében az öntési idő meghatározásakor figyelembe kell venni a lemezcsomag kiindulási hőmérsékletét. A lemezcsomag előmelegítése jótékony hatással lehet a keskeny (< 2 mm) hornyokkal rendelkező rotorok öntésénél, de a túlzott előmelegítés károsan befolyásolja az öntött rotorok elektromos és mechanikai tulajdonságait.

## Irodalom

[1] Electromagnetic and Other Electrical Applications of Aluminum:



■ 7. ábra. Egyenletes nütkitöltés szimulációja. Sötét terület: folyékony fém, világos terület: nem kitöltött hornyok (bal oldali kép); egyenletes horonykitöltés rézrotor esetében (jobb oldali kép) [5]

második fázisban (m/s)

A 9. ábra alapján látható, hogy a legnagyobb súlyú rotorok a 20-

Cast Aluminum Rotors and Switchgear

<http://www.aluminum.org/sites/default/files/Chapter%2016%20Cast%20Aluminum%20Rotors%20and%20Switchgear.pdf>

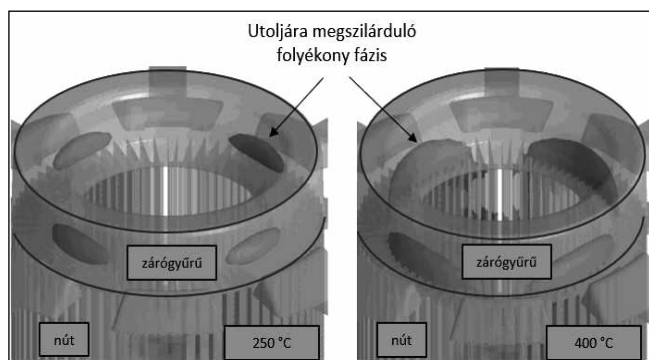
[2] *Walczer Csaba* – PhD 2. Kutatószemináriumi beszámoló, Miskolci Egyetem, 2015.

[3] *Sung-Mo Lee, Won-Jae Lee, Byung-Youn Moon*: Optimum Design of Slot Shape for Preventing the Misrun of an aluminium Motor Rotor in Die Casting, 68th World Foundry Congress 2008, pp 81–85.

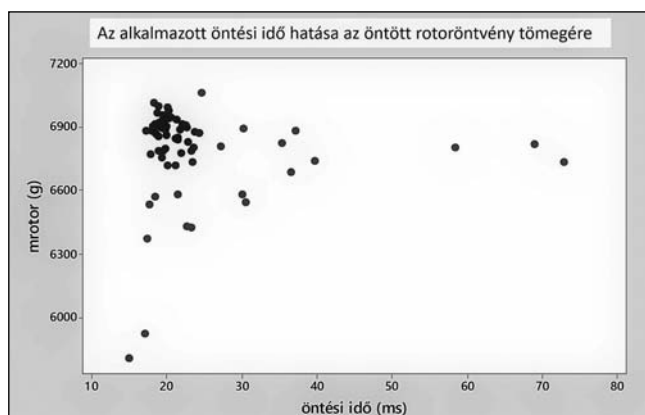
[4] <https://www.copper.org>

[5] *A. Bardos, Cs. Walczer, Z. Kéri, I. Selmeczi*: Copper rotor technology for High Efficiency motors. Vehicle and automotive Engineering 2, Proceedings of the 2nd VAE2018, Miskolc, ISSN 2195-4364

[6] *Bárdos András, Walczer Csaba*: Rézrotor nagy hatásfokú villamos motorokhoz, BKL Kohászat 2018/2



■ 8. ábra. A vasmag előmelegítésének hatása a zárógyűrűben kialakuló megszilárdulási képre. Modellezett lemezcsomag hőmérsékletek: 250 °C (bal) és 400 °C (jobb). Szimulációs eredmény [6]



■ 9. ábra. Az öntési idő hatása az öntvényben lévő réz tömegére