

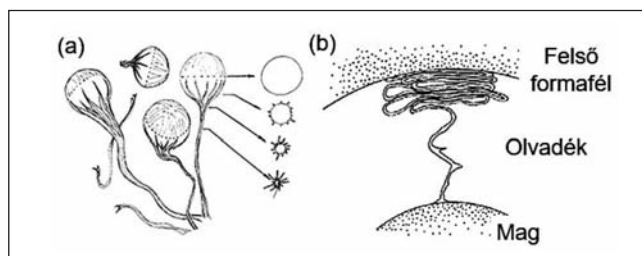
MÁDI LAURA – KAZUP ÁGOTA – BUBONYI TAMÁS – VARGA LÁSZLÓ

## A homokmagokból eltérő öntési hőmérsékletnél felszabaduló gázok nyomásváltozásának és az öntvényben megdermedt gázhólyagok kialakulásának vizsgálata

*A homokmagok kötőanyagának kiégése során képződött gázok az öntvényben gázhólyagos öntvényhibákat okozhatnak. Jelen cikkünkben bemutatjuk az eltérő öntési hőmérsékleten (680, 730 és 780 °C) öntött, azonos méretű homokmagokból fejlődő gázok nyomásváltozásának vizsgálatát. Az öntvényben megdermedt gázhólyagok megjelenési formáit és az öntvény névleges mérettől való eltérését CT, optikai és pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével vizsgáltuk.*

### 1. Bevezetés

Az öntészeti tudomány és technológia fejlődésének köszönhetően újabb lehetőségek nyílnak a komplexebb és a vékonyabb falvastagságú öntvények gyártására. A bonyolult öntvénygeometria általában nagyobb magfelületet eredményez, amellyel az olvadt fém érintkezik [1]. A magfelület növelése és a kilevegőztetési nehézségek jelentősen befolyásolják a homokmagban kialakuló nyomás nagyságát és a gázbetörési hajlamot. A gáznyomás változásának modellezése a homokmagokban az öntőipar egyik kiemelt műszaki feladata [2–5]. A homokmagból származó gázporozitást gázhólyagnak nevezzük. A gázhólyag (blow-holes) kifejezést széles körben használják az öntvényben található különféle üregek leírására. Gázhólyag alatt a folyékony fém felületén keresztül történő mechanikus gázbetörés okozta gázporozitást értjük [6]. Ez az öntvényhiba nem foglalja magába a fémbe oldott és a felületen keresztül bediffundáló gázok kiválását, valamint a felületi turbulencia által bekevert gázokat. A maggáz okozta gázhólyagok kis nyomású gázokat tartalmaznak. Nagyban különböznek a mikroporozitásoktól, amelyek kisméretűek, gömbszerűek és



1. ábra. a) A gázhólyag (gázbuborék és nyomvonala) és annak keresztirányú metszete, b) lehámlásos (exfoliation) öntvényhiba [6]

nagy nyomású gázokat tartalmaznak. A gázhólyag felületét jellegzetesen vastag, borszerű kettős oxidhártya fedi. A gázhólyag jellegzetes formája és alakja az 1. ábrán látható.

Az összefüggő gázhólyag képződése szempontjából az első gázbuborék kialakulása a legkritikusabb. A későbbiekben felszabaduló gázok tovább tágíthatják a már kialakult gázhólyagot, hiszen az első kivált gázbuborék az őt határoló oxidhártya miatt ún. nyomvonalat hoz létre az olvadékban. A gázhólyag felületi feszültsége a nagyobb hőmérsékletű helyeken lesz minimális, vagyis az utójára

**Mádi Laura** 2016-ban szerzett MSc kohómérnöki diplomát a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán öntészet szakirányon. Jelenleg a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola PhD-hallgatója. Kutatási területe: öntés során a homokmagokban kialakult gáznyomások mérése.

**Kazup Ágota** 2020-ban szerzett MSc kohómérnöki diplomát a Miskolci Egyetem Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetben, ahol jelenleg tudományos segédmunkatársként tevékenykedik. 2020-ban a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskolában folytatta tanulmányait. Kutatási területe: két- és háromdimenziós szerkezetvizsgálatok módszertanainak kutatása.

**Bubonyi Tamás** 2019-ben szerzett Pro Scientia aranyérmert, majd kohómérnöki diplomát a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán. Jelenleg a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola PhD-hallgatója. Kutatási területe: számítógépi tomográfia anyagtudományi alkalmazása.

**Dr. Varga László** öntészeti szakirányos kohómérnöki oklevelét 1999-ben szerezte a Miskolci Egyetem Kohómérnöki Karán, majd doktori disszertációját 2003-ban védte meg. 2014-ben tért vissza a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karára, ahol 2015 óta az Öntészeti Intézet igazgatója.

dermedő öntvényrészekben. A gázhólyagot a természetben fellépő erők oda mozgatják, ahol a lehető legkisebb a gázhólyag energiája. Ezt az erőt nevezik határfelületi gradiens erőnek [7].

Amennyiben a dermedési és az áramlási viszonyok lehetővé teszik, a homokmaghoz kapcsolódó gázhólyag a nyomás leépülésével vissza is húzódhat, melynek következményeként kettős oxidhártát hagy maga után. Ezt az öntvényhibát nevezik ún. lehámlásos (exfoliation) öntvényhibának, amely az 1b ábrán látható. A lehámlásos öntvényhibát a maggáz által kitágított, majd visszahúzódott, rétegesen felgyűrődött oxidhártya alakítja ki. Szerkezete lemezes, rétegelt. A gázhólyag az öntvény felső részében nyitott, szabálytalan nyomvonalra révén szivárgási útvonalat, hibát okozhat.

A gázhólyag képződésének elkerülésére számos technológiai lehetőség áll rendelkezésre. A következőkben bemutatott ajánlásokkal jelentősen csökkenthető a gázhólyag okozta öntvényhibák kialakulása. A legbiztosabb megoldás olyan kötőanyagrendszer használata, amelyből nem, vagy csak nagyon kis mennyiségű gáz keletkezik. Törekedni kell a minimális kötőanyagtartalom használatára, hiszen ezzel jelentősen csökkenthető az éghető anyagok mennyisége [8–12]. További megoldást jelenthet a késleltetett gázfejlődésű kötőanyagrendszerek alkalmazása. Gázfejlődés szempontjából a fenol-uretános rendszerek a legkedvezőbbek, míg a szilikát-észter kötőanyagrendszerek a kezdeti nagy gázfejlődésük miatt kerülendők.

A homokmag gázvezető képességét durva homok alkalmazásával vagy a magban elhelyezett gázvezetők segítségével lehet javítani. Indokolt esetben alkalmazható vákuum is, azonban a képződő kondenzátum miatt a vákuumrendszer gyakori karbantartása szükséges.

A homokmag kötőanyagának kiégése során a felszabaduló illékony anyagok a homokmag legfelső részében koncentrálnak. Amennyiben a tervezés lehetővé teszi, törekedni kell olyan elrendezésre, ahol a maggáz szabadon tud felfelé áramlani és kilevegőzni.

Az agyagbázisú mag és formázóanyag-javító paszták jelentős mennyiségű vízgőzt adhatnak le, ezért öntés előtt a szárításuk javasolt.

Maghomokkeverék készítésénél a kötőanyag egyenletes eloszlását kell biztosítani a homokszemcséken, ugyanis a nem megfelelő keverés során gyantagócok maradhatnak a homokmagban, ami öntés során akár gázrobbanást is okozhat.

A fém/forma határfelületen kialakuló repedezett, tekervényes oxidhártán keresztül a maggáz könnyedén be tud törni az olvadékba. Csökkenteni kell az oxidáló közeg és a fémolvadék közvetlen érintkezését. Különösen a nagyobb cink- és a magnéziumtartalmú alumíniumötvözetek esetén, mivel ezen ötvözetek oxidációs hajlama nagyobb.

Hasonló következménnyel járhat a külső és a belső fémhűtővasak használata is, ugyanis az illékony anyagok a folyékony fémfront előtt haladva ezeken a felületeken kondenzálódhatnak. Amikor a folyékony fém végül a hűtővashoz érkezik, a kicsapódott kondenzátum elpárolog, és gázhólyagot eredményez. Megoldást a hűtővasak kerámiai réteggel történő bevonása, majd szárítása jelenthet, ennek köszönhetően egy inert, áteresztő és nem nedvesítő felületet kapunk. A barázdált, érdes felületi réteget az olvadék nem ned-

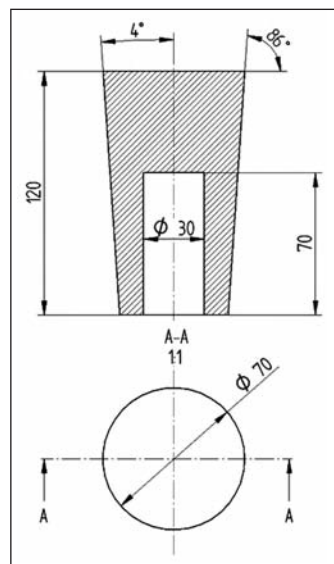
vesíti, így a barázdák alja szellőzőként működhet, lehetőséget adva a gázok szabad tágulására és eltávozására [6].

Campbell [6] a gázhólyag elkerülése érdekében az öntési hőmérséklet növelését javasolja. Elmélete szerint így a maggázoknak lehetőségük van a folyékony fémen keresztül kilevegőzni, a dermedés kezdetén létrejövő vékony kéreg kialakulása előtt. Ez legtöbb esetben az öntvény károsodásával párosul, hiszen az elszökött gázhólyag a nyomvonalra révén szivárgásos öntvényhiba kialakulásához vezethet. Erbslöh és társai [13] az öntési hőmérséklet, a formatöltési sebesség és a metallosztatikus nyomás növelésére hívja fel a figyelmet.

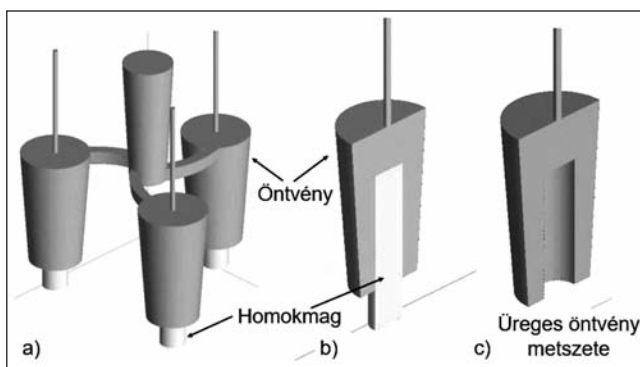
## 2. Kísérleti körülmények

Cikkünkben bemutatjuk az Al-7%Si-0,35%Mg-0,4%Cu öntészeti alumíniumötvözet három különböző (680-730-780 °C) öntési hőmérsékleten, 70 mm átmérőjű öntvények esetén, azonos méretű homokmagokból felszabaduló gázok nyomásváltozásának vizsgálatát.

A kísérleti körülmények megalkotása a korábban alkalmazott kísérleti összeállítások továbbfejlesztése alapján történt [14–16]. A homokmag geometriája minden esetben  $\varnothing 30 \times 100$  mm volt. A mag öntvénybe történő belégási hossza 70 mm volt. A mag 30 mm mélyen ült a magfészekben, ami megakadályozta a formatöltés közbeni elmozdulását. A metallosztatikus nyomással arányos, homokmag feletti olvadékoszlop magassága 50 mm volt. A 70 mm átmérőjű, 4°-os formázási ferdeségű kísérleti öntvény műszaki rajza a 2. ábrán látható. A 3. ábrán bemutatjuk a kísérleti öntvényt a magokkal és a beömlőrendszerrel. A 4. ábrán a kísérleti összeállítás látható a formaszekrényvel, az adaggyűjtővel és a nyomástávadókkal.



■ 2. ábra. A kísérleti öntvény metszete



■ 3. ábra. a) kísérleti öntvény magokkal és a beömlőrendszerrel, b) a homokmagot tartalmazó öntvény metszete, c) az üreges öntvény metszete

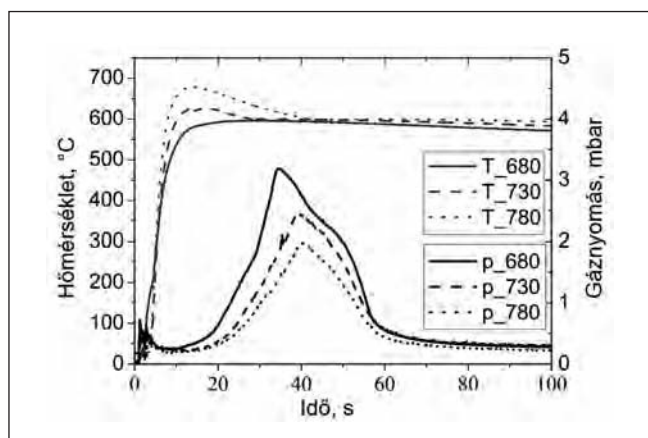


■ 4. ábra. Kísérleti összeállítás. Bal oldalon az alsó formaszekrény, a nyomástávadók és az adatgyűjtő. Jobb oldalon az alsó és felső formafél lezárt állapotban.

A kísérleti homokmagok önkötő furángyantás homokkeverékből készültek 1 m/m% gyanta- és 0,5 m/m% katalizátortartalommal. A homokmagok térfogatsűrűsége minden esetben 1,5 g/cm<sup>3</sup> volt. A homokmagok előállításához 0,22-0,3 mm szemcseméretű, sajdkovói homokot használtunk. Az alkalmazott, közel azonos szemcseméret esetén kiküszöbölhetők az eltérő granulometriai tulajdonságokból származó zavaró hatások. A fejlődő gázok elvezetésére szolgáló acélcsővet (Ø 6 × 300 mm) a próbatest axiális középvonalába, a fém/ forma határfelülettől 5 mm-re helyeztük el [16]. A homokmagból fejlődő gázokat szilikon cső segítségével továbbítottuk a nyomástávadóhoz. Kísérleteink során a homokmag felső síkja felett 5 mm-re, védőcsőben elhelyezett K típusú hőelem segítségével mértük az olvadék hőmérsékletét. A forma bentonitos-keverékből készült, 8% bentonit, 4% víz felhasználásával. A mérésekhez három Baumer típusú frontmembrános nyomástávadót, míg az adatgyűjtéshez egy univerzális 8 csatornás HBM QuantumX-MX840B típusú mérőerősítőt használtunk.

### 3. Kísérleti eredmények

A magban kialakult gáznyomásértéket a gázfejlődés intenzitása és a gázok tágulását akadályozó felületre kifejtett erők határozzák meg. A magban feltorlódt gázok út-



■ 5. ábra. Az olvadék hőmérsékletének, valamint a felszabaduló gázok nyomásváltozása az idő függvényében

ját a homokmag homokszemcséi között található tekervényes járatok, valamint a gáz/olvadék határfelületen fellépő erők akadályozhatják. A természeti törvények alapján a gázok a kisebb ellenállás felé áramlanak. A magok gázfejlődési intenzitása nem egyenletes, az elején nagy mennyiségű gáz keletkezik, aztán csökken a fejlődő gáz mennyisége. Az 5. ábrán a homokmagból felszabaduló gázok nyomásának és az olvadék hőmérsékletének változása látható az idő függvényében.

A vizsgált öntési hőmérsékletek esetén a felszabaduló gázok nyomáseredményeiből megállapítható, hogy az öntési hőmérséklet növelésével csökken a maximális gáznyomás ( $p_{max}$ ) értéke. Az öntési hőmérséklet növelésével nő a homokmagok hőterhelése, így várhatóan nagyobb gáznyomásra számíthatunk. Azonban különböző hőmérsékleteken az olvadék szilárd fázisaránya jelentősen eltér egymástól, ami a maggáz megjelenési formáit is befolyásolhatja. A nagyobb szilárd fázisarányal rendelkező olvadék esetén a gáz/olvadék határfelület alatt a gázok feltorlódnak, nagyobb nyomást eredményezve. Kis szilárd fázisarányal rendelkező olvadékok esetén a maggáz útja nem akadályozott, így önálló gázhólyagok formájában az olvadékba áramolhatnak.

A Thermo-Calc program segítségével lehetőség van különböző összetételű ötvözetek adott hőmérsékleten történő szilárd fázisarányának a meghatározására. A  $p_{max}$  időpontjához tartozó hőmérsékletértékeket ( $T_{mért}$ ) összevetettük a Thermo-Calc programban számolt hőmérsékletértékekhez ( $T_{számolt}$ ) tartozó szilárd fázisarányokkal ( $f_s$ ). Kísérleteink során a mag felett 5 mm-re mértük az olvadék hőmérsékletét, a következőkben bemutatott értékek ebben a pontban érvényesek. A mag/olvadék határfelületen jelenlévő szilárd fázisarány nagyobb. Az 1. táblázat tartalmazza a különböző öntési hőmérséklet esetén a magokból felszabaduló gázok nyomásának maximális értékét és megjelenési időpillanatát, valamint az olvadék mért és számított hőmérsékletét és a hozzá tartozó szilárd fázisarányt.

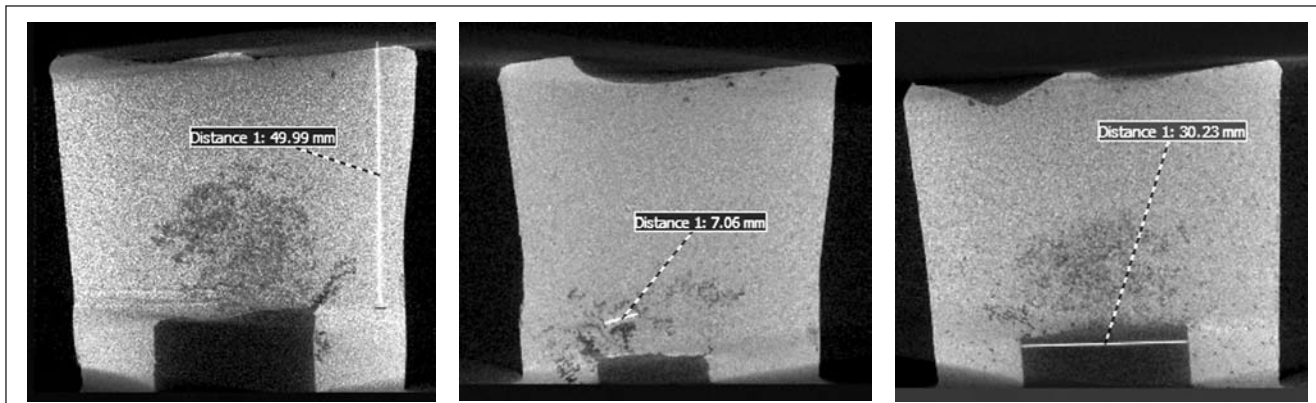
A vizsgált (Al-7%Si-0,35%Mg-0,4%Cu) öntészeti alumíniumötvözet Scheil-féle lehülés alapján számított szilárd fázisarány és a fejlődött gázok nyomásának kapcsolatáról elmondható, hogy a legnagyobb szilárd fázisarány (32%) esetén alakul ki a legnagyobb gáznyomás (3,171 mbar).

A különböző öntési hőmérsékletek esetén kialakuló eltérő szilárd fázisarányok és a homokmagokból fejlődő gázok nyomáskülönbségei miatt az öntvényeket további vizsgálatoknak vetettük alá. Az öntvényekben található gázhólyagok megjelenési formáit CT, optikai és pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével vizsgáltuk. A 6. ábrán a komputertomográfiai vizsgálat során kimentett DICOM-metszeten a különböző öntési hőmérsékleten képződött gázhólyagok jellegzetes alakja látható. A gázhólyag méretét és az

1. táblázat. Különböző öntési hőmérséklet esetén a  $p_{max}$  értéke és megjelenésének időpillanata, valamint az olvadék hőmérséklete és a hozzá tartozó szilárd fázisarány

Öntési hőmérséklet, °C	$p_{max}$ , mbar	$t_{p_{max}}$ , s	$T_{mért}$ , °C	$T_{számolt}$ , °C	$f_s$
680	3,171	34	594,97	594,85	0,321
730	2,449	39	599,19	599,85	0,262
780	1,976	40	615,01	615,85	0,002





■ 6. ábra. Különböző öntési hőmérsékleten (balról jobbra haladva 680, 730 és 780°C-on) öntött darabokban található gázhólyagok

öntvény névleges méretétől való eltérését a myVGL program segítségével vizsgáltuk.

A felvételeken látható, hogy a 680 °C-on öntött darab fém/mag határfelületét a maggáz meggörbítette, valamint egy összefüggő gázhólyag alakult ki az öntvényben. A jelenség azzal magyarázható, hogy amennyiben a feltorlódt, nagy nyomású gázok eléri a kritikus nyomást, képesek nagy, összefüggő gázhólyag formájában betörni az olvadéka. A 730 °C-on öntött öntvényben kisebb (Ø 7 mm), jól elkülöníthető gázhólyagok jelenlétét tapasztaltuk. A 780 °C-on öntött darabban sok, kis, diszperz gázhólyag található. Az olvadékok gáztartalmát az öntés során igyekeztünk azonos szinten tartani. Az általunk vizsgált azonos ötvözetminőség és öntvénygeometria esetén a szívódásos zsugorodás mértéke megegyezik.

A gázhólyagok további vizsgálata céljából a kísérleti öntvényekből optikai mikroszkópos vizsgálatra alkalmas darabokat munkáltunk ki, valamint a darabok töretfelületét pásztázó elektronmikroszkóp segítségével is vizsgáltuk. Az 50 × 70 mm-es mintákról mozaik mikroszkópos felvételeket készítettünk, ugyanis a nagyméretű gázhólyagok a mikroszkóp legkisebb, 50 ×-es nagyítása esetén sem fértek bele a látótérbe. A mozaikkép készítése során a mikroszkóp 50 ×-es nagyítású képekből, mozaikszerűen állítja össze a felvételt. A következőkben a 680 °C-on és a 780 °C-on öntött minták porozításelemzését mutatjuk be. A porozítástartalom százalékos meghatározása az ImageJ-program segítségével történt. A 7. ábrán a darabok bináris képei láthatóak.

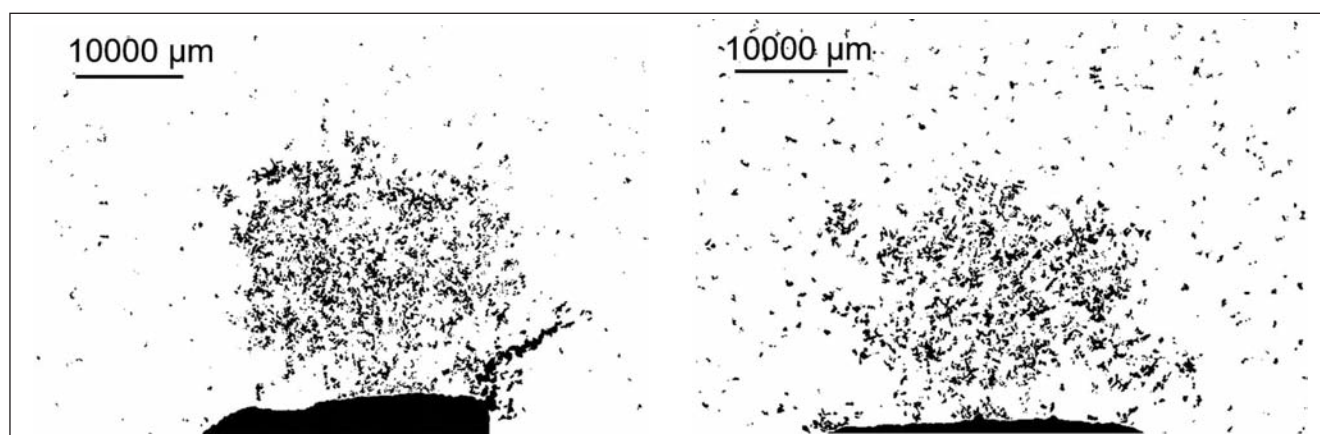
A darabok bináris képein látható, hogy a 680 °C-on öntött darabban a fém/mag határfelület jelentősen meggörbült, és egy nagy összefüggő gázhólyag alakult ki. A 780 °C-on öntött darabban a fém/mag határfelület csak kismértékben tér el a névleges mérettől, azonban az öntvényben elszórtan sok kis gázhólyag figyelhető meg. Az összporozitás-tartalom (beleértve a maggáz által meggörbített határfelületet) 680 °C esetén 9,051%, míg 780 °C-on 7,373%.

Az öntvényekben található kisebb gázhólyagok morfológiáját és méretét az öntvények töretfelületeiről készült SEM-felvételeken mutatjuk be, amelyek a 8. ábrán láthatók.

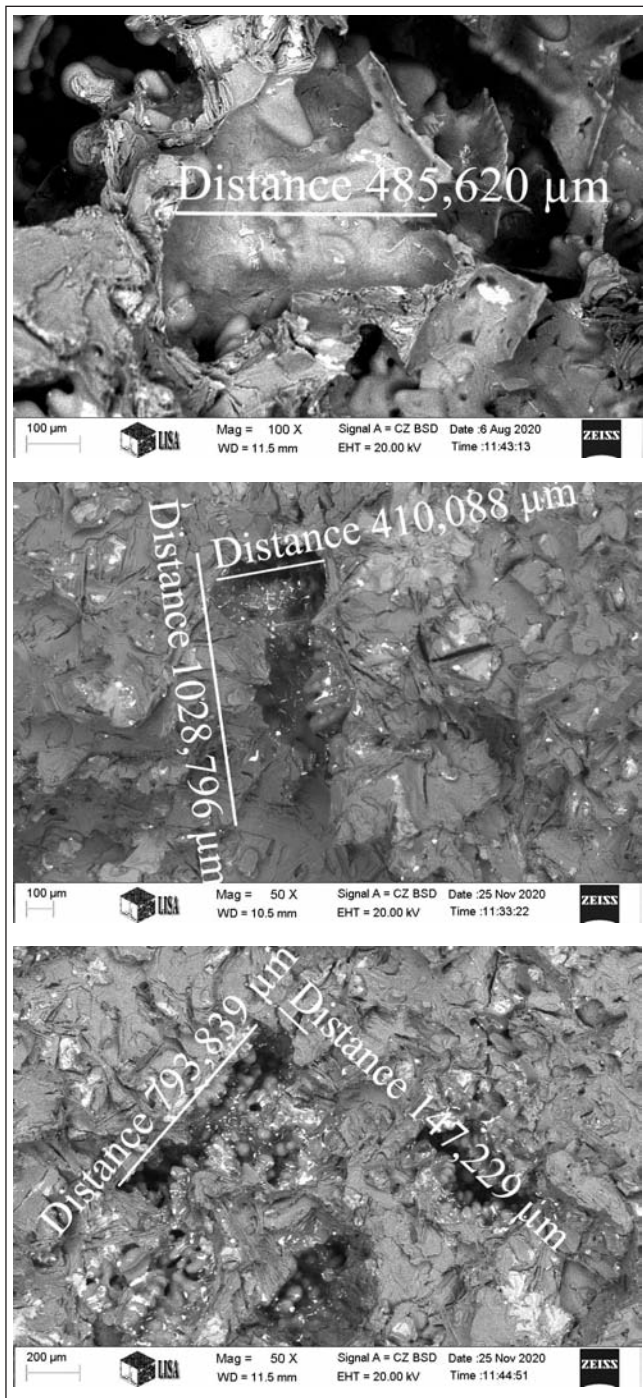
A töretfelületen található gázhólyagok lenyomatának mérete 680- és 730 °C-on ~410-485 µm, nyomvonallal együtt ~1029 µm. A 780 °C-on öntött darabban a gázhólyagok alakja lapított, méretük ~790 × 150 µm.

### Összefoglalás

Az alkalmazott AISi7-es öntészeti ötvözet öntése esetén magokból fejlődő gázok nyomásának vizsgálata során arra a következtetésre jutottunk, hogy az öntési hőmérséklet növelésével csökken a gázok maximális nyomásának értéke. Az olvadék szilárd fázisaránya jelentősen befolyásolja a maggáz megjelenési formáját. 680 °C-os öntési hőmérséklet esetén a magot körülvevő olvadéknak már jelentősen nagy a szilárd fázisaránya (32%), aminek köszönhetően a magban nagy nyomás alakulhat ki (3,171 mbar). Amennyiben a maggáz eléri a kritikus nyomást, összefüggő gázhólyag formájában képes betörni az olvadéka. 780 °C-os öntési hőmérséklet esetén az olvadék szilárd



■ 7. ábra. A 680 °C-on és a 780 °C-on öntött darabok bináris képei (fekete: porozitás, fehér: alumínium)



■ 8. ábra. Az öntvény töretfelületén található gázhólyagok (felülről lefelé haladva 680-730-780 °C-on öntött darabokban)

fázisaránya csekély (0,2%), így a maggázok, ha legyőzik a határfelületi összehúzó erőt, akadálytalanul az olvadékba áramolhatnak kicsi, diszperz gázhólyagokat eredményezve.

### Köszönetnyilvánítás

A CT-vizsgálatok a Miskolci Egyetem 3D Finomszerkezet vizsgálólaboratóriumában található, YXLON FF35 típusú berendezés segítségével készültek. A SEM-felvételeket a Thermo Scientific Helios G4 PFIB CXe berendezés segítségével Kovács Árpád készítette. A szilárd fázisarány meghatározását a Thermo-Calc (verziószáma: 4.1.0.4995 és a SSOL5 (SGTE General Alloy Solution Database, v 5.0)) program segítségével Végh Ádám készítette.

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.

### Irodalom

- [1] L. Winardi, H. E. Littleton, C. E. Bates: Pressures in Sand Cores, AFS Transactions, 2007. vol.115., Paper 07-062(04).pdf, 303–312.
- [2] Y. Maeda, H. Nomura, Y. Otsuka, H. Tomishige, Y. Mori: Numerical simulation of gas flow through sand core. Int. J. Cast Metals Res., 2002, 15, 441–444.
- [3] Laurentiu Nastac, Shian Jia, Mihaela N. Nastac & Robert Wood: Numerical modeling of the gas evolution in furan binder-silica sand mold castings – International Journal of Cast Metals Research VOL. 29. NO. 4, 2016, 194–201.
- [4] Hassan Khawaja: Semi-implicit method for pressure-linked equations (SIMPLE) solution in MATLAB – Int. Jnl. of Multiphysics Volume 12 Number 4, 2018, 313–325.
- [5] A. J. Starobin and C. W. Hirt: FLOW-3D Core Gas Model: Binder Gas Generation and Transport in Sand Cores and Molds – Flow Science Report 04-14, 2014
- [6] John Campbell: Complete Casting Handbook – 10.5. Rule 5: 'Avoid core blows' 635–659.
- [7] Kaptay György: Határfelületi jelenségek a fém-anyaggyártásban. 1. rész. A határfelületi erők osztályozása, BKL Kohászat 142. évfolyam, 3. szám, 2009, 39–46.
- [8] S. Ravi, J. Thiel: New Method for Measuring Gas Evolution in Chemically Bonded Sands AFS Transactions, 2016
- [9] J. Mocek, A. Chojecki: Evolution of the gas atmosphere during filling the sand mould with iron alloys. Archives of Foundry Eng. 9, 2009, nr 4 pp 135–140.
- [10] H. W. Diert, A. L. Graham, R. M. Praski: Gas evolution in foundry materials. Its source and Measurement. AFS Trans. 1976, 55, pp 221–228.
- [11] J. Orlenius, U. Gotthardsson, A. Diószegi: Mould and Core Gas Evolution in Grey Iron Castings, International Journal of Cast Metals Research 2008.
- [12] W. D. Scott, P. A. Goodman, R. W. Monroe: Gas generation at the Mold-Metal Interface, AFS Transaction 78-150, 1978, 599–610.
- [13] IKO-Erbslöh, Jörg Baier, Martin Köpper: Manual of Casting Defects, Incidence and avoidance of defects attributable to moulding sands, 1994., p. 51–55.
- [14] Tóth L.: Gázfejlődés az öntödei formázó és maghomok keverékekben. A bentonitos formázókeverékek aktív bentonit és víztartalmának összefüggése a plaszticitással és a repedési szilárdsággal, PhD-disszertáció, ME Öntészeti Intézet, Miskolc, 1997.
- [15] A. Chojecki, J. Mocek: Gas pressure in sand mould poured with cast iron, Archives of Foundry Engineering Volume 11, Issue, 1/2011, 9–14.
- [16] S. Ravi, J. Thiel: Prediction of Core Gas Pressure from Chemically Bonded Sand Molds Using Process Simulation Software, AFS Transactions, Paper 17-097 v125 –2017, Page 1 of 8