

Lassított utántömörítő csap működtetéssel gyártott nyomásos öntvények vizsgálata

Testing of high pressure die castings produced with reduced squeeze pin velocity

NYESTE VIKTOR^{1,2,@}, tervezőmérnök, doktorandusz; DR. MIKÓ TAMÁS³, tud. főmunkatárs;
KAZUP ÁGOTA³, tud. segédmunkatárs; KOVÁCS ÁRPÁD³, mérnök tanár; DR. MOLNÁR DÁNIEL⁴, egy. docens;
DR. MERTINGER VALÉRIA³, intézetigazgató, egy. tanár

¹Hanon Systems Hungary Kft., Székesfehérvár,

²Miskolci Egyetem, Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Miskolc,

³Miskolci Egyetem, Fémteni Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, Miskolc,

⁴Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet, Miskolc

@E-mail: viktor.nyeste@student.uni-miskolc.hu

A lokális utántömörítés az iparban széles körben alkalmazott nyomásos öntészeti megoldás olyan öntvények esetén, melyeknél az eltérő falvastagságokból adódó eltérő helyi dermedési idők miatt zsugorodási porozitások alakulnának ki. Az utántömörítés, a nyomásos öntési folyamat szerves részét képező kiegészítő folyamatként van jelen a teljes öntési ciklusban. Az utántömörítő csap indítása jellemzően egy meghatározott kapcsolási ponthoz képesti késéssel történik, amit késleltetési időnek neveznek. Az egyes alkalmazott késleltetési idők eltéréseit eredményeznek a szövet-szerkezetben, amely eltérések megértése fontos a gyártás során keletkező selejtelek csökkentésének céljából.

Az egyes késleltetési időkkel gyártott öntvények összehasonlítását többféle módon lehet elvégezni, pl. sűrűségméréssel, szakítószilárdság vizsgálatával, számítógépes tomográfias (CT) elemzéssel, ugyanakkor fontos, hogy az egyes vizsgálati eredmények számszerűsíthetőek legyenek, elkerülve így a szubjektivitást.

A jelenlegi gyakorlat szerint gyártástechnikai szempontból fontos következtetésekre lehet rávilágítani a szakítópróbatestek töretfelületeinek vizsgálata alapján, viszont ezek a megállapítások általában szubjektívek. További fontos megállapítások tehetők az optikai mikroszkópos és CT-felvételek ilyen irányú elemzésével, azonban ebben az esetben az inhomogenitások kiértékelése vizuálisan lehetséges, ami alapján nem lehetséges a számszerű összehasonlítás elvégzése.

Az eddigi eredményeink alapján megállapítható, hogy a lassított utántömörítő csap mozgatással gyártott öntvények szövetszerkezeti jellemzőinek eredményei átértékelik a szakirodalomban fellelhető eredményeket. Az utántömörítő csap kisebb sebessége a korai indítás mellett is megfelelő szakítószilárdsági értékeket tud biztosítani az öntvényben, mivel elegendő idő áll rendelkezésre ahhoz, hogy a hatékony utántömörítés megtörténjen.

Kulcsszavak: nyomásos öntés, lokális utántömörítés, benyomódási úthossz

In the high pressure die casting process (HPDC), local squeezing is commonly used in castings, where shrinkage porosities can develop due to different wall thicknesses. Local squeezing is an integrated part of the casting process, but this can be considered an additional operation which occurs after the completion of the mold filling process. Usually, the squeeze pin starts postponed to a specific switching point, which term is called the delay time. Different delay times will cause different results in the microstructure, which is essential to understand reducing the potential rejects that may occur during production.

There are several ways to compare the properties of castings produced with different delay times. Comparisons must be made on a quantitative basis, excluding subjective factors. Such tests may include measurement of density, comparison of tensile strength, and computer tomography (CT) analysis. On the other hand, the examination of the fracture surfaces of the tensile test specimens can be done subjectively in most cases. By the analysis of the micrographs and CT scans in this manner, quantitative comparisons cannot be done, but important observations can be made.

Keywords: die casting, local squeeze pin, stroke of squeeze pin

1. Bevezetés

A nyomásos öntészet széles körben elterjedt gyártástechnológiai módszer, melynek előnye a többi könnyűfém öntési technológiával (pl. a gravitációs öntéssel) összehasonlítva, hogy rövid ciklusidővel lehet komplex geometriájú, kis falvastagsággal rendelkező öntvényeket előállítani [1]. Olyan komplex öntvények esetén, melyek több funkciót integrálnak, kialakulhatnak eltérő falvastagságok, ahol eltérőek lesznek a dermedési idők is [2, 3]. Ha egy adott öntvénykeresztmetszet tömörre táplálása nehézségekbe ütközik, akkor ott lokálisan zsugorodási porozítások és fogyási üregek alakulhatnak ki [4, 5]. Ezekben az öntvényrészekben helyi utántömörítés alkalmazásával lehet kompenzálni a kialakuló inhomogenitásokat [6, 7]. Az ilyen öntvénygeometriák esetén a helyi utántömörítés fontos része a nyomásos öntészeti folyamatnak, ami külön folyamatalként is vizsgálható, mivel az utántömörítés gyakorlatilag akkor történik meg, amikor a formatöltés befejeződött és elkezdődik az olvadék dermedése a formaüregben belül [8].

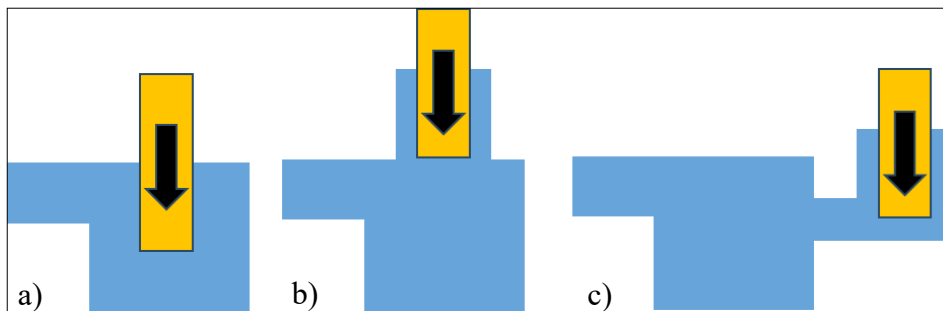
A gyakorlatban kétféle, ún. direkt és indirekt utántömörítést különböztetünk meg [9, 10]. Az 1. ábrán látható kialakításokkal lehet az utántömörítésre szolgáló csapot elhelyezni. Direkt utántömörítés során (lásd 1. ábra) a sárga színnel jelzett utántömörítő csap közvetlenül az öntvénybe kerül benyomásra, és mint furatképző vesz részt a végleges öntvénygeometria kialakításában. Ennek a megoldásnak előnye, hogy nem igényel pótlólagos megmunkálást az utántömörítésből visszamaradó anyag eltávolítása. A másik típusú direkt utántömörítés esetén (lásd 1. ábra), amikor az utántömörítő csap az anyaghalmozódási hely közelében végzi el az utántömörítést. Ebben az esetben az utántömörítő csap nem hatol mélyebbre az öntvény felületénél. A megoldás egyik előnye, hogy az esetlegesen az utántömörítő csap felületén lévő oxidos zárványok nem kerülnek be az öntvénybe.

Indirekt utántömörítés során (lásd 1. ábra) az utántömörítő csap nem közvetlenül az öntvénygeometriához kapcsolódik. A megoldás hátránya, hogy az utántömörítés hatékonysága jelentősen csökken a kritikus öntvényrésztől való távolsága és a kisebb öntvényhez

csatlakozó keresztmetszet miatt. A b) és c) megoldások esetén az utántömörítés miatt visszamaradó geometriai részt megmunkálással kell eltávolítani.

Maga az utántömörítés művelete, vezérléstechnikai szempontból két technológiai paraméterrel kapcsolódik a nyomásos öntészeti folyamathoz [12, 13]. Az egyik – és talán a legfontosabb paraméter – az utántömörítő csap indításának késleltetése, ami minden esetben egy meghatározott, ún. kapcsolási pont-hoz képest kerül megadásra, ami lehet az öntödugattyú indulásához, azaz az 1. fázis kapcsolási pontjához beállított késleltetési idő, vagy a formatöltés kezdetét meghatározó 2. fázis kapcsolási pontjához beállított késleltetési idő [6].

Az adott öntőgép technológiai beállításától függ, hogy melyik időponthoz képest történik az utántömörítés késleltetésének a megadása. Ezt az időpontot minden esetben úgy célszerű megválasztani, hogy az adott időpillanatban a formatöltés már teljes mértékben megtörténjen. Az utántömörítés hatékonysága nagyon alacsony azokban az esetekben, mikor a csap mozgatásának indulásakor nem történt meg a formatöltés, vagy abban az esetben, amikor bár már megtörtént a formaüreg megtelése, de a dermedés még nem vagy csak alig kezdődött meg. A túl korai indítás azt jelenti, hogy még nagyon alacsony az olvadék szilárdfázis aránya, így gyakorlatilag az utántömörítő csap benyomása az olvadékba fog megtörténni. Ekkor a dermedés úgy fog lezajlani, hogy az utántömörítő csap eléri a maximális helyzetét, és így a dermedés során alig tudja utántáplálni a kialakuló fogyási üregeket. Ha túl késői az utántömörítő csap indítása, akkor ennek az ellenkezője fog történni, mivel ebben az esetben magas szilárdfázis arány mellett történik a csap működtetése. Ekkor a már megdermedt öntvényben alig lehet utántömörítést végezni, és fennáll a veszélye annak, hogy akár az utántömörítő csap, akár maga az öntvény is roncsolódhat [6, 14, 15]. Ebben az esetben a kialakuló szövetszerkezet sem lesz elfogadható, és az öntvény felületén jellemzően laminációs hiba is jelentkezhet az utántömörített öntvényrész közelében. Mind a korai, mind a késői indítás esetén öntvényselejt keletkezik, vagy rosszabb esetben maga



1. ábra. Direkt a), b) és indirekt c) utántömörítés sematikus elrendezése [11]

a gyártóeszköz is meghibásodhat, ami jelentős termelés kiesést okozhat.

További fontos paraméter az utántömörítőcsap visszahúzásának az ideje. Ennek a lépésnek a dermedés során kialakult szövetszerkezetre nincsen hatása, de öntvényhibát okozhat, ha túl későn vagy túl korán kerül sor a csap kihúzására.

Az ipari gyakorlatban az öntődékben az utántömörítő csap elmozdulásának sebességét jellemzően nem módosítják, illetve az utántömörítő csap benyomódási úthosszát is csak ritkán ellenőrzik. A szakirodalom és az ipari gyakorlat alapján elmondható, hogy az utántömörítő csap mozgási sebessége jellemzően ~5,0 mm/s. A szerzők által elvégzett mérések eredményei is ezt a mozgási sebességet igazolták.

Kísérleteink célja, hogy összefüggéseket és tudományos alapú eredményeket szolgáltatassunk az alumínium-szilícium (AlSi) ötvözetek helyi utántömörítéshez kapcsolódó fémtani viszonyokról. Fontos cél, hogy az egyes tömörítési beállítások hatásának kvantitatív összehasonlítása olyan egzakt paraméterek alapján történjen, mint a mechanikai tulajdonságok vagy a porozitás mértéke. Cikkünkben különböző utántömörítési paraméterekkel gyártott öntvények szakítószilárdsági és porozitási értékeit hasonlítjuk össze, melyeket a szakító próbatestek töretfelületeinek elemzésével is kiegészítettük.

2. Vizsgált anyagminőségek, alkalmazott kísérleti és vizsgálati módszerek

A kísérleteket egy függőleges elrendezésű nyomásos öntőgépen többfészkes szerszámmal, üzemszerű szériagyártási körülmények mellett végeztük. Min-

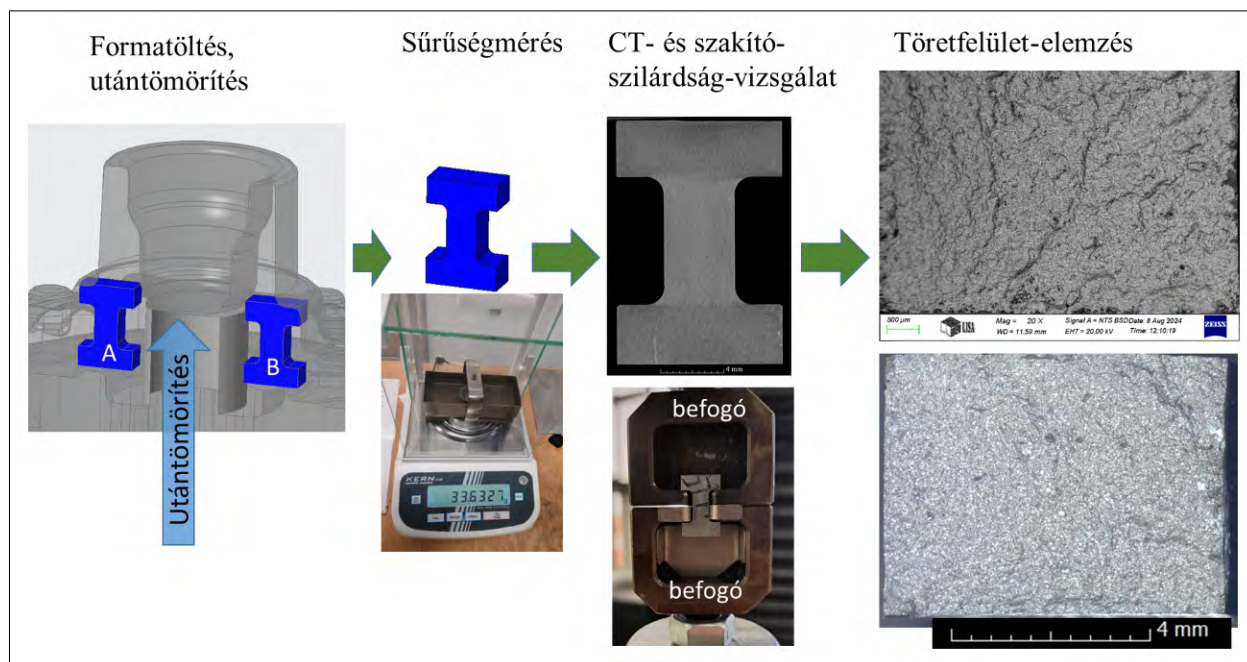
den egyes vizsgált paraméter beállítással tíz-tíz darab öntvény leöntésére került sor. A vizsgált próbatestek kimunkálása minden esetben az azonos fészkekben pozícionált öntvényből történt meg.

A vizsgált öntvények anyagminősége szabványos $AlSi_9Cu_3$ ötvözet. Az öntvényekkel szemben támasztott fő követelmény a nyomástömörség, mely előírást az öntvénygeometriai kialakítása miatt csak helyi utántömörítés alkalmazása esetén lehet teljesíteni.

Az elvégzett vizsgálatok a késleltetési időre és az utántömörítő csap sebességének hatására vonatkoztak. Mivel az ipari gyakorlatban nem gyakori az utántömörítő csap sebességének változtatása, és a szakirodalmi források alapján sem lehetett információt szerezni ezek hatásáról, így a kísérletsorozat az utántömörítő csap sebességének határértékei közötti különbségek vizsgálatával kezdődött.

A 2. ábra mutatja be az öntött alkatrészen a lokális utántömörítés helyét és a mintavételi pozíciókat. A próbatestek az utántömörítő csap tartományának legközelebbi régiójából kerültek kimunkálásra. A kimunkált próbatesteken sűrűségvizsgálatot és komputertomográfiai (CT) mérést végeztünk, majd azok elszakítása megtörtént. A szakadási felületeket pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltuk.

Az öntés során öt különböző paraméter beállítást alkalmaztunk (4, 5, 6, 7, 8 minta). Egy sorozatban minden egyes beállítással tíz párhuzamos mintadarabot öntöttünk le, amelyeket 1-től 10-ig számoztuk (lásd 4.1, ..., 4.10). Az elvégzendő vizsgálatok minden legyártott öntvényből két darab próbatest kimunkálásával (lásd 4.1A, 4.1B) zajlott. Az egyes késleltetési időket (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 s) a 2. fázis kapcsolási



2. ábra. A kísérleti-vizsgálati folyamat a mintavételi helyekkel

pontjához képest határoztuk meg. Az utántömörítő csap sebessége minden esetben 1,0 mm/s volt, ami a korábban bemutatott, iparban alkalmazott ~5,0 mm/s sebességhez képest lassított utántömörítő csap mozgási sebességnek minősül.

Az 1. táblázat a kísérleti paramétereket foglalja össze. A 4. minta esetén 0,5 s a késleltetési idő, ami azt jelenti, hogy a formaüreg kitöltésének pillanatához képest közvetlenül megtörtént az utántömörítő csap indítása. Ebben az esetben – a szakirodalom szerint – a tömörítés várható mértéke gyakorlatilag elhanyagolható. Az 5. minta esetén a beállított késleltetési idő értéke 1,0 s, ebben az esetben az utántömörítés hatása várhatóan javul. A 6. minta esetén az utántömörítő csap késleltetésének a beállítása 1,5 s, ami a szériagyártás során használt beállításhoz közeli érték. A 7. és 8. minta esetén, ahol a késleltetési idő 2,0 s, illetve 2,5 s, az utántömörítés hatékonyságának a csökkenése várható a szakirodalom alapján.

1. táblázat. Kísérleti paraméterek

Mintajelölés	Gyártási paraméterek	
	Késleltetési idő (s)	Utántömörítő csap sebessége (mm/s)
4.1A... 4.10B	0,5	1,0
5.1A... 5.10B	1,0	1,0
6.1A... 6.10B	1,5	1,0
7.1A... 7.10B	2,0	1,0
8.1A... 8.10B	2,5	1,0

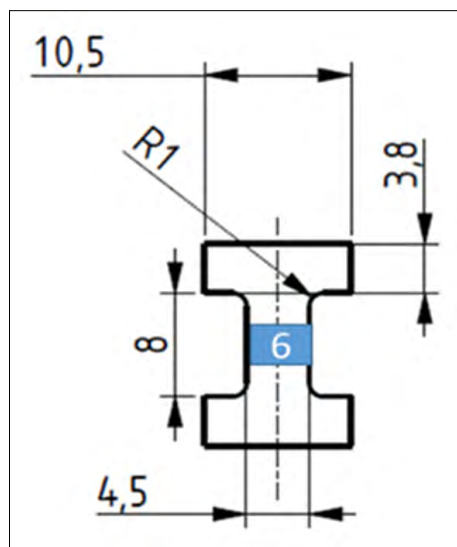
A leöntött minták tulajdonságainak számszerűsíthető összehasonlítása érdekében sűrűségmérést, szakítószilárdsági és CT-s képalkotó vizsgálatokat végeztünk. Vizsgálataink fő célkitűzése a porozitás mint a kritikus paraméter meghatározása volt. A közvetlen mérés a szakítópróbatestek CT-felvételén alapult, melyhez a Miskolci Egyetem 3D Laboratóriumában lévő YXLON FF35 μ CT berendezést használtuk (140 kV, 170 μ A, 9,1 mikronos voxelméret).

A porozitást, a próbatest CAD-modellje alapján származtatott térfogat ($v_{\text{próbatess}}$) és a megmunkált próbatestek tömege ($m_{\text{próbatess}}$) alapján számítással határoztuk meg. A próbatestek tényleges sűrűségének értékeit az (1) és (2) összefüggések segítségével határoztuk meg:

$$\rho_{\text{elméleti}} = \frac{m_{\text{próbatess}}}{v_{\text{próbatess}}}, \quad (1)$$

$$\text{porozitás} = 100 - \frac{\rho_{\text{tényleges}}}{\rho_{\text{elméleti}}}, \quad (2)$$

ahol $\rho_{\text{elméleti}} = 2,75 \text{ g/cm}^3$.



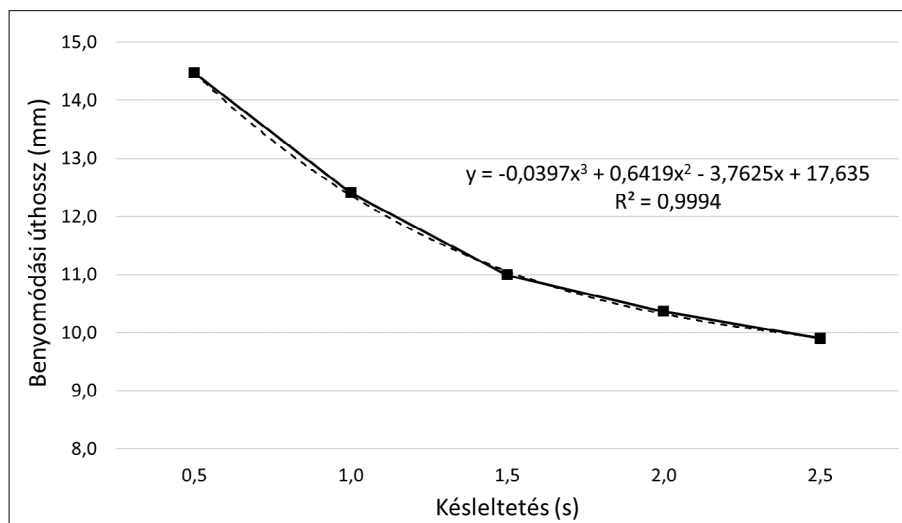
3. ábra. A szakítópróbatest geometriája

A nem szabványos szakítópróbatestek alakjának és méretének meghatározásával alkalmazkodni kellett az öntvény geometriájához. A 3. ábrán látható a ki-munkált próbatest geometriája a méretekkel.

Vizsgálataink célja az egyes beállításokból adódó tulajdonságok összevetése volt, a mért értékek szabványhoz való hasonlítása nem képezte kísérleteink célját. A mechanikai vizsgálatok elvégzéséhez Instron 5982 univerzális mechanikai anyagvizsgáló berendezést használtunk (100 kN erőmérőcella, 250 mm méretű AVE videoextenzométer, 3 mm/perc keresztfejmozgatás). A nem szabványos szakító próbatestek rögzítésére egyedileg készített acél befogóeszközt használtunk (2. ábra). A minták nyúlását videoextenzométerrel határoztuk meg, a törött minták felületét Nikon FZ61 típusú sztereomikroszkóppal és Zeiss AVOMA 10 pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk.

3. Eredmények

Az egyes beállításokkal öntött mintaöntvények le-gyártása után elsőként az azokon mérhető tényleges benyomási úthosszak visszamérése történt meg. A mérés tárgya annak a meghatározása volt, hogy a különböző késleltetési beállítások miként módosították az utántömörítő csap által megtett úthosszt. A 4. ábrán látható, hogy a késleltetési idő növelése következtében az utántömörítő csap elmozdulása a várakozások-nak megfelelően változott. A kísérlet során használt késleltetési érték változtatásának hatására harmadfokú polinom szerint csökkent az utántömörítő csap által megtett úthossz. A szakirodalom alapján várható volt, hogy lesz olyan késleltetési idő érték, amelynél az öntvény minőségi értékei egy optimumot fognak mu-tatni, ami alapján a túl korai és késői indítások esetén várható volt a mechanikai tulajdonságok értékeinek



4. ábra. Az utántömörítő csap átlagos benyomódási úthossza a késleltetési idő függvényében

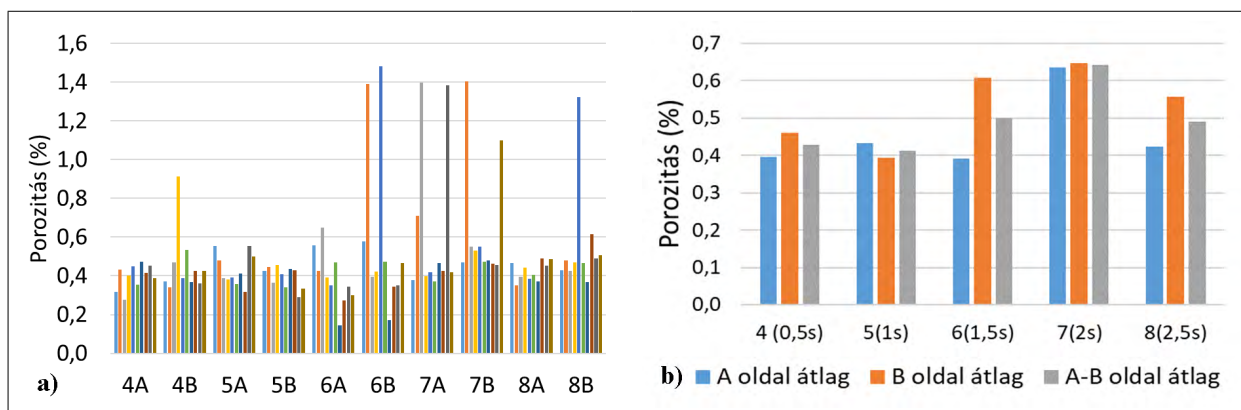
csökkenése [13]. Vizsgálataink során az utántömörítő csap lehetséges maximális elmozdulása 15,0 mm volt, ami az utántömörítést végző munkahengerben kialakított fix ütközővel került biztosításra.

Vizsgálataink még a szakítóvizsgálat elvégzése előtt a leöntött mintaöntvényekből kimunkált próbatestek sűrűségmérésével folytatódtak. Ahogy az a 2. és 3. ábrán látható, a próbatestek a rendelkezésre álló hely miatt kis méretűek, a próbatestek tömege nem érte el a 2,0 grammot. Az 5. ábrán látható az öntvényekből kimunkált próbatestek sűrűsége és az egyes mintákra számolt átlagadatok. Alapvetően a nyomásos öntvényekhez képest a porozitás alacsony értékű. Jól látható, hogy néhány mintánál kiugró adat található, aminek köszönhetően a 6. minta B oldali és a 7., 8. minták porozitásértéke nagyobb. Szintén megfigyelhető volt, hogy az öntvény A és B oldali adata között nagyobb eltérés mutatkozik. Ez alól csak a 7. minta kivétel, mely esetben mind az A, mind a B oldalon volt a legnagyobb mértékű a porozitás.

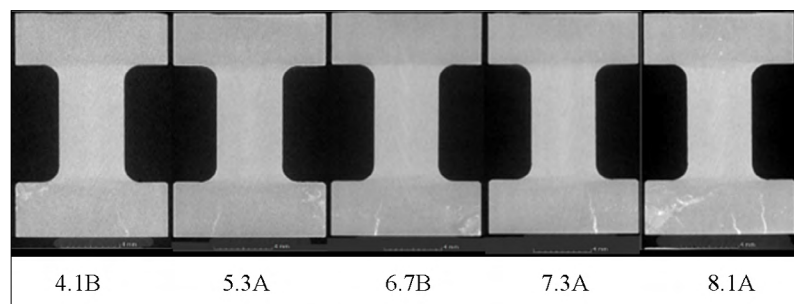
Érdekes eredmény, hogy az 1,0 mm/s csapmozgási sebesség alkalmazásánál a kis késleltetéssel lehetett a legkisebb porozitású öntvényt előállítani.

A szakítóvizsgálat előtt elvégzett CT-vizsgálat eredményei is a fentieket erősítik meg. A berendezés felbontási határától nagyobb méretű pórusok gyakorlatilag nem voltak kimutathatók. A 6. ábrán látható egy-egy példa minden utántömörítési állapotra. A CT berendezés érzékenységét mutatja, hogy az egyes felvételeken a próbatestek alsó részén megfigyelhető a világosabb színű, nagyobb sűrűségű fázisok dúsulása.

A CT-vizsgálatok után a szakítóvizsgálat elvégzése volt a következő lépés. A szakirodalom alapján itt is várható volt, hogy a korai és a késői késleltetések esetén lesznek a legalacsonyabbak a szakítószilárdság-értékek, mivel várhatóan azoknál a beállításoknál csökken az utántömörítés hatékonysága. Viszont már a porozitási eredmények függvényében megállapítható volt, hogy a kis utántömörítő csap sebességnek köszönhetően a mért értékek nem ezt az eredményt hozták. A 7. ábrán látható minden egyes próbatest szakítószilárdsága és azok átlagos értékei. A szilárdsági értékek a próbatestek A és B oldalán jellemzően eltérnek. A legkisebb eltérés a legkisebb porozitáskülönbség esetén volt tapasztalható. Az átlagadatokat megvizsgálva a porozitásértékekkel az is összhangban



5. ábra. Az egyes mintadarabok a) porozitása b) és átlagértékei

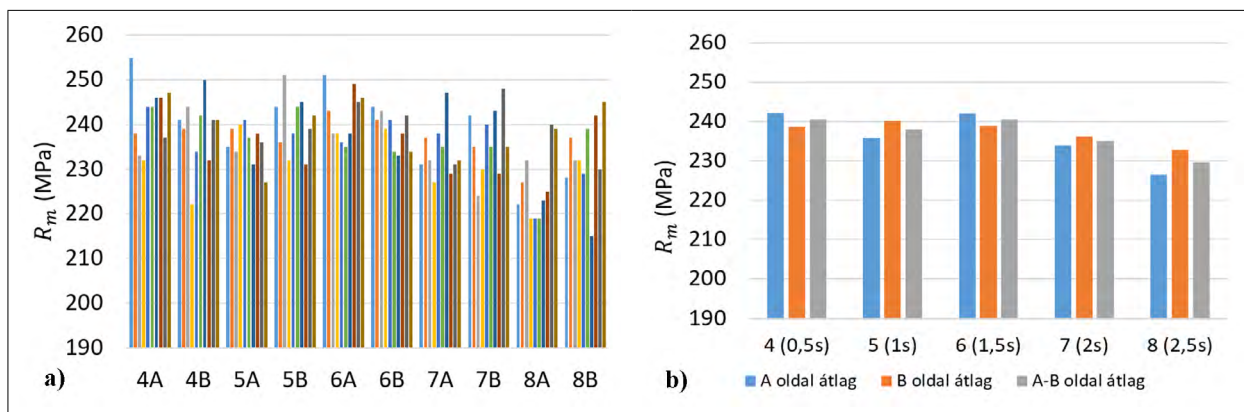


6. ábra. Szakitópróbatest-minták

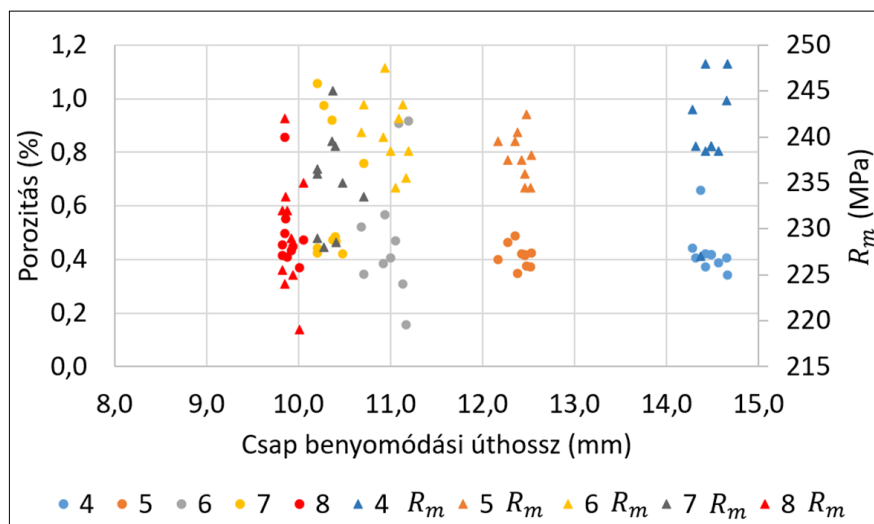
van, hogy a 6B és 7., 8. jelű minták szilárdsága a legkisebb.

A szakirodalom szerint a 4. és 8. mintáknak kellett volna a legalacsonyabb értékeket elérniük, viszont ezzel ellentétesen, a 4. minta mutatta a legnagyobb szilárdságot. Az elvégzett vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy az egyes próbatestek mért szakitószilárdság-értékei $\sim 5,0\%$ eltérésen belül vannak, így még a legalacsonyabb 7. és 8. minta értékei is elfogadhatóak.

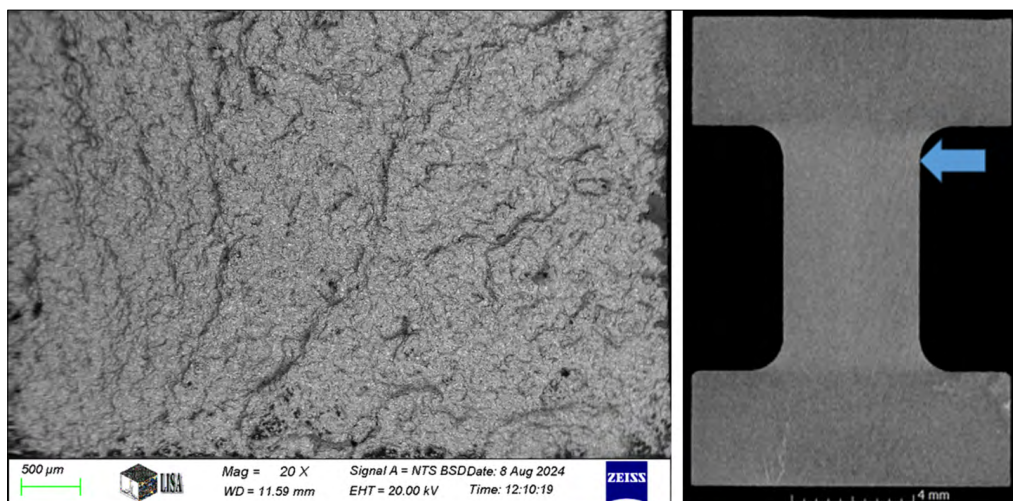
Ha az utántömörítő csap benyomódási úthosszainak függvényében ábrázoljuk a szakitószilárdság- és porozitásértékeket (8. ábra), akkor egyértelműen megállapítható, hogy a 4. minta hozza a legjobb (legnagyobb szilárdság, legkisebb porozitás) eredményeket. Ebben az esetben az utántömörítő csap elmozdulás értéke közel volt az elméleti maximális úthosszhoz, amelyet viszont az csak ún. üresjárat esetén tudna megtenni. Ez a figyelemre méltó új eredmény ellentétes a szakirodalmakban publikált eddigi ismeretekkel.



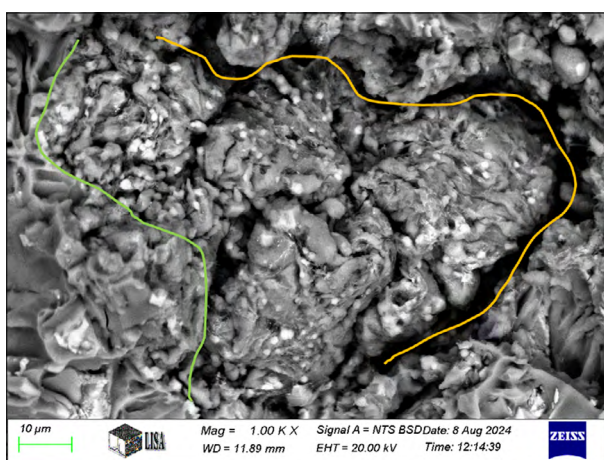
7. ábra. Az egyes mintadarabok a) szakitószilárdság- és b) átlagértékei



8. ábra. Az egyes mintadarabok A és B oldali átlagporozitása, átlagszilárdsága a benyomódási úthossz függvényében



9. ábra. A 4.4B. próbatettöt és CT-felvételei



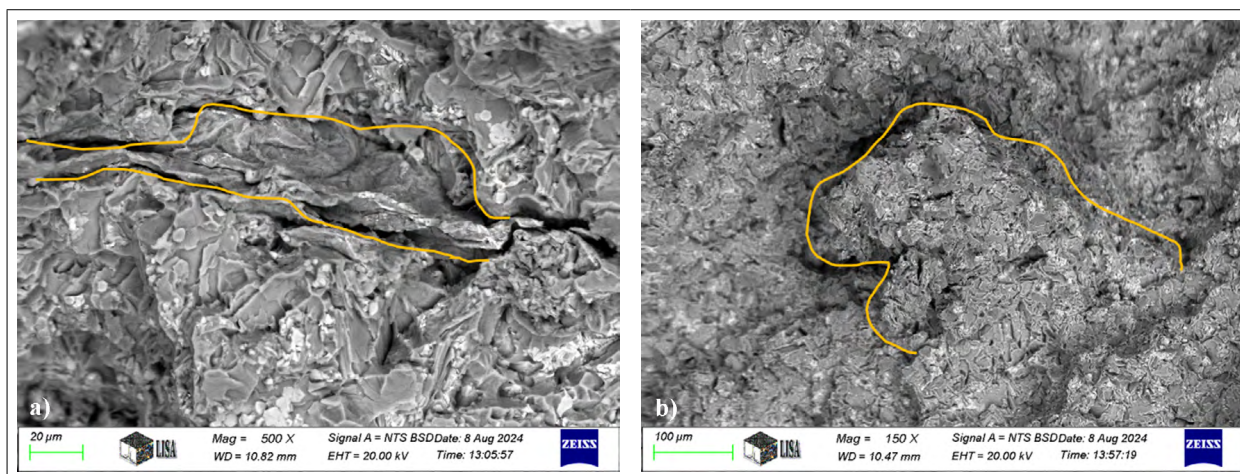
10. ábra. Utántömörített rész a kialakult zsugorodási porozitásban a 4.4B mintán

A következőkben az egyes mintadarabok töretfelvételeiről készült felvételeket és azok elemzését mutatjuk be.

A 9. ábrán a kiugróan alacsony szilárdsági értéket (220 MPa) mutató 4.4B öntvényből kimunkált pró-

batest törete és CT-felvétele látható, ahol a jobb oldali ábrarészen a kék nyíl jelöli a szakadás helyét. A próbatest esetén sem a töreten, sem a CT-felvételeken nem lehetett olyan jellegű inhomogenitást azonosítani, amely indokolná az alacsony szakítószilárdság-értéket.

A 10. ábrán látható SEM-felvételen az utántömörítés hatása figyelhető meg ugyanezen 4.4B próbatest esetén. A sárga vonallal körülhatárolt rész jelöli a kialakult zsugorodási porozitást, amibe az utántömörítés során lett beprésselve a még olvadék állapotban lévő fém. Viszont hibába történt meg az utántömörítés, a porozitás felülete és a beprésselt fém nem tudott összeolvadni. A zöld vonal azt jelöli, hogy a beprésselt fém melyik irányból érkezhett, mivel ennek határán az alap szövetszerkezethez való kapcsolódás fedezhető fel. Mivel lassú volt az utántömörítés, a megszilárdulás közben kialakuló zsugorodási pórusok folyamatosan után voltak táplálva olvadékkal. A kép méretskáláján is látható, hogy nagyságrendileg a 10 µm tartományról van szó, ami magyarázza, hogy a CT-felvételen miért nem láthatóak ezek a hibák.



11. ábra. Töretfelületről készült SEM-felvételek az 5.1A minta a) és a 6.6A minta b) esetében

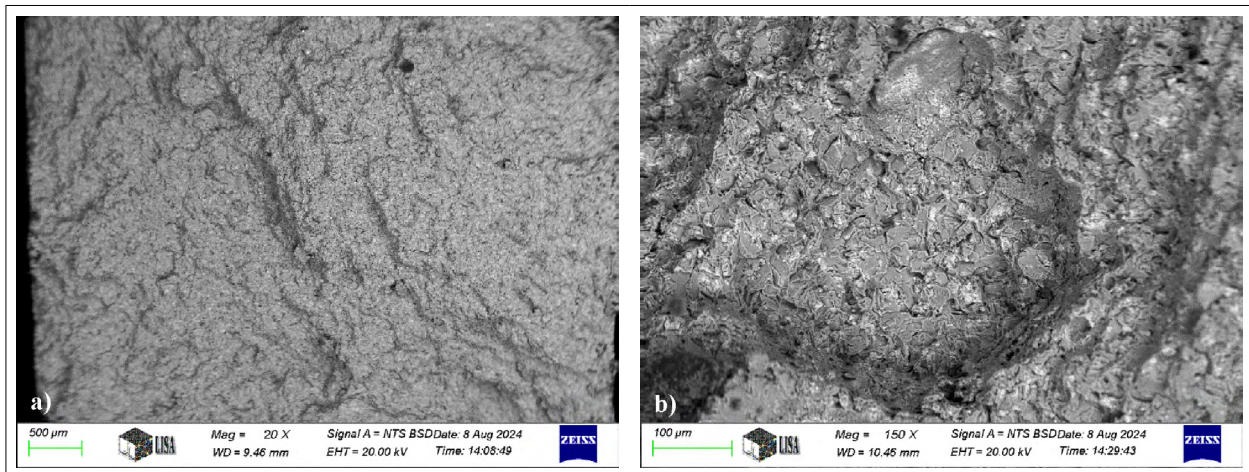
A 11. ábra a) részén az 5.1A minta, míg b) részén a 6.6A minta töretfelületéről készült felvételeken is hasonló jelenségek figyelhetők meg. Jól kivehető a kialakuló zsugorodási porozitások üregeibe benyomult fém az utántömörítés során. Megállapítható, hogy a 4.4 minta esetén mért 10 μm méret tartományából a 20–100 μm mérettartományba növekedett a hibahelyek nagysága. Ahogy nőtt a késleltetési idő, úgy növekedtek az egyes hibahelyek nagyságai. A 11. ábra a) részén, az 5.1A mintához tartozó felvételen megfigyelhető továbbá az α -szilárd oldatra jellemző tarajos töretfelület.

A 7.3A minta esetén (12. ábra) már sokkal jobban kivehetőek a kialakuló gáporozitások, amit valószínűleg a későbbi tömörítőcsap indítás (2,0 s) eredményezett. Ezek a gáporozitások méretükben még nem meghatározóak, a töretfelületen nem számottevőek, jobbára csak a SEM-felvételeken lehet ezeket a kialakult hibahelyeket megfigyelni. A gáporozitás szabályos gömb alakú. Utántömörítés során ebbe a szabá-

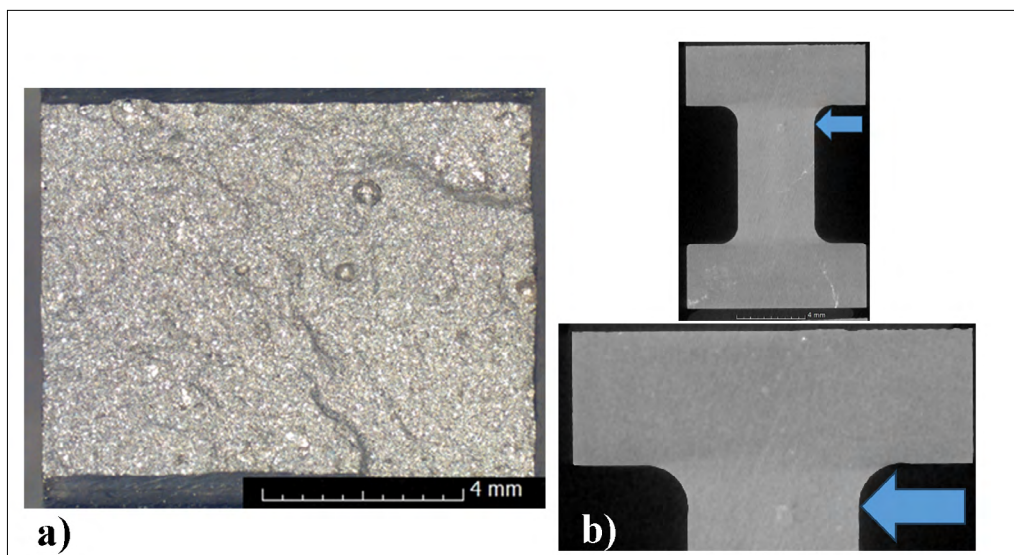
lyos üregbe nyomult be a még olvadék állapotban lévő fém, de a gáporozitás felületét borító oxidhártya miatt a két fémfront már nem tudott összehegedni.

A 8.4A mintánál a tömörítőcsap késleltetése már 2,5 s értékű volt (13. ábra), a kialakuló gáporozitások még nagyobb méretben jelentek meg. Az optikai mikroszkóppal készült felvételen is megfigyelhetők a gáporozitások, melyek megmagyarázzák az elért gyengébb szakítószilárdsági értéket (219 MPa). A CT-felvételen kék nyíl jelöli a szakadás helyét. A felvételen jól látszik a kialakult gáporozitás és az abba, az utántömörítés során bepréselt fém, mely kitöltötte a félgömb alakú üreget.

A minta SEM-felvételeinek elemzése során szintén megfigyelhető a kialakult oxidos hártya a gáporozitás felületén (14. ábra). A 14. ábrán a 8.6B mintadarabja látható. Az a) felvételen látható az utántömörítés során a gáporozításba bepréselt fém, míg a b) felvételen láthatóak az egyes kisebb és nagyobb méretű gáporozitások.



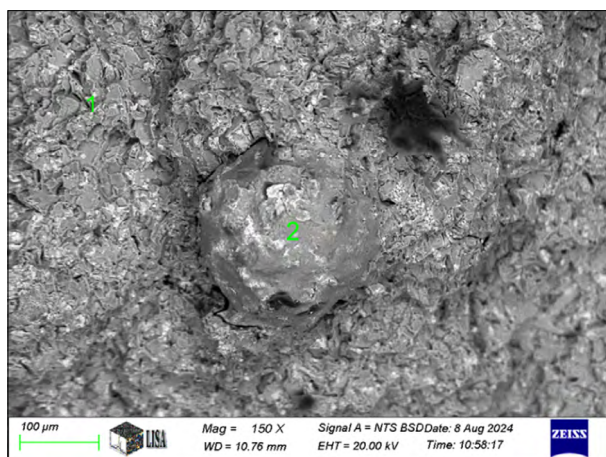
12. ábra. A 7.3A próbatest SEM-töretfelvételei



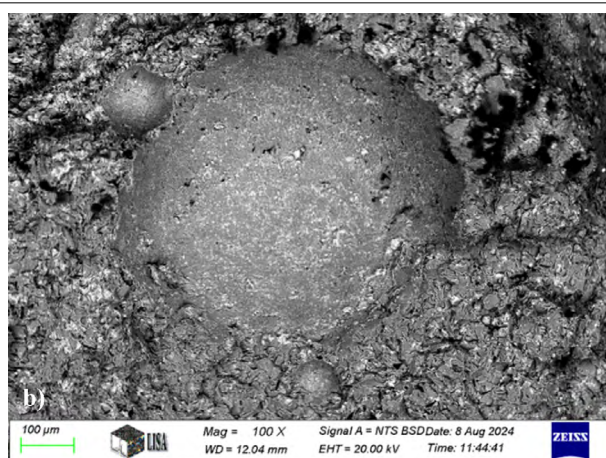
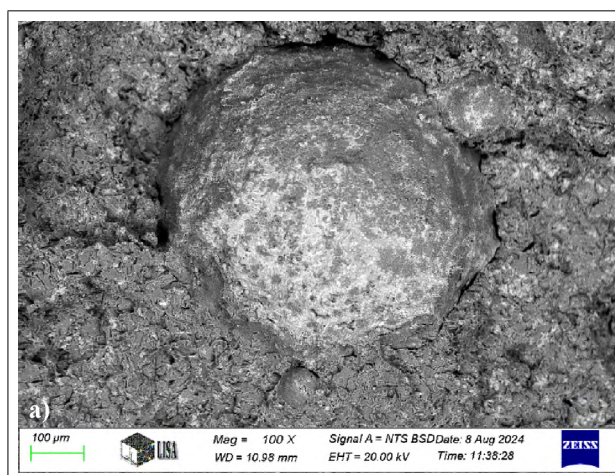
13. ábra. A 8.4A próbatest fénymikroszkópos töretképe és CT-felvételei

4. Összefoglalás

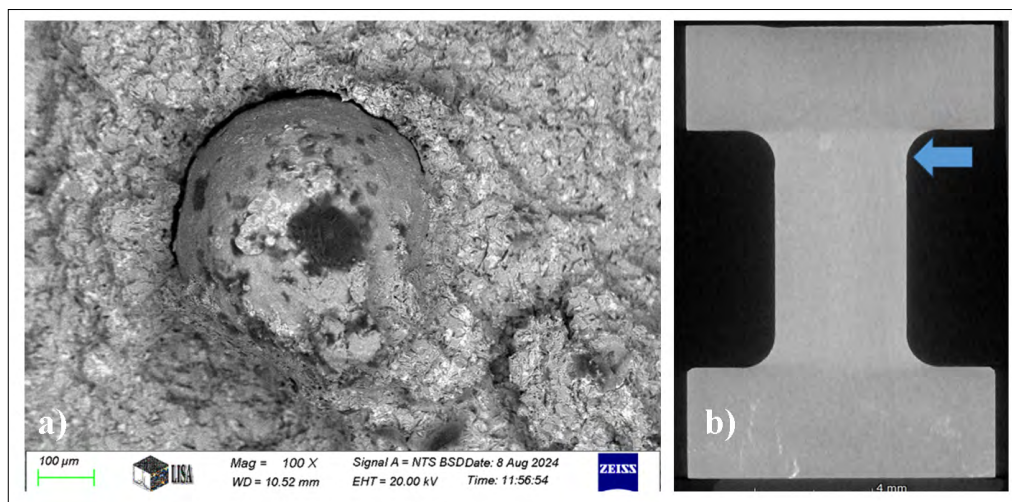
Ipari körülmények között végzett, 1,0 mm/s sebességgel mozgó utántömörítő csappal legyártott minták esetén a porozitás és szakítóvizsgálat eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy az utántömörítő csap korai indítása nem feltétlenül jelentett hátrányt a szövetszerkezet kialakulása szempontjából. A korai indítás ellenére (0,5 s és 1,0 s) az utántömörítő csap megfelelően tudott működni, mert a kis mozgatási sebesség miatt volt idő és lehetőség a megfelelő utántömörítés elvégzésére. A kialakuló gáz és szívódási porozitásokat az utántömörítés során érkező olvadék nagy részben ki tudta táplálni.



14. ábra. A 8.4.A minta töret-SEM-felvételei



15. ábra. A 8.6B minta töretfelületének SEM-felvételei



13. ábra. A 8.4A próbatest fénymikroszkópos töretképe és CT-felvételei

A 16. ábra a 8.10A minta töretét mutatja. Egy olyan gázporozításba bepréselt fémcseppet láthatunk, ahol megfigyelhető a fémes kapcsolat az alapszövettel, a tömörítéssel érkező fém iránya, illetve a gázporozítás félgömb alakú felülete. Ez a hiba a CT-felvételen is azonosítható, ahol a kék nyíl jelöli a szakadás helyét.

Az elvégzett vizsgálatok arra irányultak, hogy a kísérleti gyártás során legyártott öntvények minőségi jellemzőit milyen mérési módszerek alapján lehet számszerűleg összehasonlítani. Bár a próbatestek töretfelületeinek elemzése ebből a szempontból nem

tartozik a kitűzött célok közé, de azok vizsgálata értékes információt szolgáltat a próbatestekkel kapcsolatosan.

- A szakirodalomnak megfelelően igazolásra került, hogy az utántömörítő csap elmozdulása a várakozásoknak megfelelően változott, azaz a késleltetési idő növelésével csökkent a benyomódási úthossz. Ez annak ellenére is így történt, hogy az utántömörítő csap sebessége kisebb volt az ipari szériagyártás során alkalmazott értékektől.
- A próbatestek sűrűség és szakítószilárdság mérési eredményei más tendenciát mutattak, mint a szakirodalom alapján várt maximumos eloszlás. Várhatóan a korai (0,5 s) és késői (2,5 s) utántömörítő csap indításainak kellett volna eredményezni a legalacsonyabb értékeket, míg az 1,0 s és a 1,5 s késleltetési idő esetén kellett volna kialakulniuk a legjobb minőségi jellemzőknek. Ezzel szemben a korai indítású, azaz a 0,5 s késleltetéssel legyártott darabok esetén kaptuk a legjobb értékeket.
- Összeségében elmondható, hogy a sűrűséget illetően 2,0–3,0%-ban tértek el a minták eredményei, valamint a szakítószilárdsági eredmények eltérései sem haladták meg az ~5,0%-ot. Ez azt jelenti, hogy az utántömörítő csap lassú mozgatása sokkal több lehetőséget biztosít a megfelelő késleltetési idő megválasztására.
- A kismértékű eltérések ellenére a próbatestek töretfelületei jelentős eltérést mutattak a kialakult inhomogenitások tekintetében. A 0,5 s és 1,0 s késleltetésű minta esetén a SEM-felvételeken 10–20 µm-es tartományban fedezhetőek fel az utántömörítés jelei, de ezek nem olyan inhomogenitások, melyek negatívan befolyásolhatnák a mechanikai tulajdonságot. Az 1,5 s és 2,0 s késleltetés esetén már megfigyelhető volt a gázporozítások méreteinek növekedése, míg a 2,5 s késleltetés alkalmazásakor már markánsan voltak jelen a töretfelületen a kialakult gázporozítások. A töretfelvételek alapján a CT-felvételeken is beazonosíthatóak a hibahelyek, melyek jellemzően úgy tudtak kialakulni, hogy a gázporozítás szabályos gömb alakú oxidos felületébe préselődött be az utántömörítés során az olvadék. A kialakult oxidos felület, és a kései indítás során még olvadékállapotban lévő fémfront hőmérséklete viszont már nem volt elég magas ahhoz, hogy azok össze tudjanak hegedni, koherensé tudjanak válni. Az utántömörítés következtében a bepréselt olvadék teljes mértékben felvette a félgömb alakú gázporozítás alakját, emiatt sok esetben a hibahely nem volt azonosítható a CT-analízis során.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük a Hanon Systems Auto Parts Hungary Kft. rétsági telephelyén dolgozó kollegák önzetlen segítségét a gyártóeszközök átalakításában és a mérések kivitelezésében.

Irodalom

- [1] J. Jorstad, D. Apelian: Pressure assisted processes for high integrity aluminum castings. *Inter Metalcast*, 2 (2008) 19–39. <https://doi.org/10.1007/BF03355420>
- [2] W. Kurz, D. Fisher, M. Rappaz: *Fundamentals of Solidification*. Trans Tech Publications, 1984.
- [3] M. Hamasaki, H. Miyahara: Solidification microstructure and critical conditions of shrinkage porosity generation in the casting process of JIS-ADC12 (A383) alloy. *Mater. Trans.*, 54/7, (2013) 1131–1139. <https://doi.org/10.2320/matertrans.F-M2013806>
- [4] D. M. Stefanescu: *ASM Metals Handbook*, Vol.15 – Casting, ASM International, 1988.
- [5] D. Jenő: *Nyomásos Öntészeti Ismeretek*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [6] D. Künstner: Untersuchung der Wirkung von lokalem Nachverdichten im Druckgießverfahren und Entwicklung einer geeigneten Versuchsform zur Bestimmung optimaler Nachverdichtungsparameter. *Diploma Thesis*, Leoben, 2013.
- [7] F. Peti, G. Strnad: The effect of squeeze pin dimension and operational parameters on material homogeneity of aluminium high pressure die cast parts. *Acta Mariensensis. Seria Technologica*, 16/2 (2019) 7–12. <https://sciendo.com/article/10.2478/amset-2019-0010>
- [8] P. Borlepwar, S. Biradar: Study on reduction in shrinkage defects in HPDC component by optimization of localized squeezing process. *Inter Metalcast*, 13/4, (2019) 915–922. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-00295-9>
- [9] H. Peter, K.-P. Tucan: Untersuchung der Einflussgrößen Kühlung, Nachverdichtung und Legierungssparameter auf die Gefügeeigenschaften von Druckgussbauteilen. *Giesserei*, 1 (2017) 26–31.
- [10] Csaba M., Richárd S., Dániel M.: Kettős működtetésű utántömörítés hatása a vastag falú nyomásos öntvény belső térfogati inhomogenitására. *BKL, Kohászat*/5–6 (2020) 5.
- [11] K.-P. Tucan, P. Hofer: Untersuchung des Einflusses lokalen Kühlens und Nachverdichtens auf die Gefügeeigenschaften von Druckgussbauteilen. *Austrian Cooperative Research*. [Online]. Elérhető: <http://www.ogi.at>
- [12] M. Tsuji, T. Nakano, T. Toyoshima: Drive Control Method for a Squeeze Pin. *US 2002/0167104A1*, szabadalom, 2002. november 14.
- [13] X. Niu, M. Anthony, P. Tuzi: High pressure leak tightness improvement by a unique local squeezing process.
- [14] M. Tsuji: Squeeze Pin Control System in Die Casting Machine. *USO05787963A*, szabadalom, 1998. augusztus 4.
- [15] E. S. Kim, K. H. Lee, Y. H. Moon: A feasibility study of the partial squeeze and vacuum die casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 105/1–2 (2000) 42–48. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00557-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00557-4)