



**Doktori Iskola vezetője: Prof. Dr. Mertinger Valéria**

Miskolci Egyetem – Anyag- és Vegyészmérnöki Kar  
Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola  
Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

**Számítógépi tomográfia alkalmazása az öntvényekben  
előforduló pórusok és a szakítóvizsgálattal meghatározható  
mechanikai tulajdonságok közötti kapcsolat elemzésére**

**Doktori értekezés tézislevele**

**Készítette:**

Hargitai-Kazup Ágota, okleveles kohómérnök

**Tudományos vezető:**

Prof. Dr. Gácsi Zoltán

**2025**

**Miskolc**



## Tartalomjegyzék

---

|           |                                                                        |           |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>Bevezetés .....</b>                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2</b>  | <b>Tudományos nyitott kérdések.....</b>                                | <b>2</b>  |
| <b>3</b>  | <b>Csökkentett nyomáson dermedő próbák porozítása .....</b>            | <b>4</b>  |
| 3.1       | Elvégzett vizsgálatok.....                                             | 4         |
| 3.2       | Eredmények összefoglalása.....                                         | 6         |
| <b>4</b>  | <b>Szakító próbatestek pórusszerkezete .....</b>                       | <b>7</b>  |
| 4.1       | Elvégzett vizsgálatok.....                                             | 7         |
| 4.2       | Eredmények összefoglalása.....                                         | 13        |
| <b>5</b>  | <b>Tézisek.....</b>                                                    | <b>14</b> |
| <b>6</b>  | <b>A kutatási eredmények hasznosulása.....</b>                         | <b>21</b> |
| <b>7</b>  | <b>Summary.....</b>                                                    | <b>22</b> |
| <b>8</b>  | <b>Köszönetnyilvánítás .....</b>                                       | <b>23</b> |
| <b>9</b>  | <b>Nyilatkozat a mesterséges intelligencia (MI) használatáról.....</b> | <b>23</b> |
| <b>10</b> | <b>Saját publikációs jegyzék .....</b>                                 | <b>24</b> |
| 10.1      | A doktori értekezés eredményeihez kapcsolódó írásbeli publikációk..... | 24        |
| 10.2      | A témában megjelent további publikációk .....                          | 24        |
| <b>11</b> | <b>Irodalomjegyzék.....</b>                                            | <b>26</b> |



## 1 Bevezetés

A könnyűfém öntvények előállítására az alacsony nyomású öntéstechnológiát (LPDC) elterjedten alkalmazzák előnyös tulajdonságai miatt: gazdaságos, automatizálható, jól szabályozható, illetve segítségével kiváló termékminőség állítható elő [1, 2].

Az öntvények fontos minőségi jellemzője a bennük előforduló pórusok mennyisége és eloszlása, melyek csökkentik a teherbíró keresztmetszetet. Ezentúl a nagyméretű, összetett morfológiájú pórusok felületén heterogén feszültségállapotok alakulnak ki [3–7].

A számítógépi tomográfias (CT) szerkezetvizsgálati módszer a metallográfiai vizsgálatokhoz képest előnyösebben alkalmazható, ugyanis az egyes fázisok térbeli kiterjedése hatékonyabban és pontosabban tárható fel, mely elengedhetetlen a pórusszerkezet és a mechanikai tulajdonságok közötti kapcsolat meghatározásához. Ennek megértéséhez, a megbízható eredményekhez az elemzési módszerek előnyeinek, korlátjainak, valamint alkalmazhatóságuk megismerése lényeges feladat [8].

Bár a porozitás mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával számos kutatómunka foglalkozik, az eredmények tekintetében nincs egyetértés. A pórusok jellemzői és az öntvények mechanikai tulajdonságai közötti mennyiségi összefüggések leírása jelenleg is intenzív kutatások tárgya [5, 7, 9–11]. A356 LPDC öntvények mechanikai, valamint a 3D-s, illetve 2D-s pórusszerkezeti jellemzőit korszerű statisztikai eszközökkel (gépi tanulóssal) elemeztem, amivel azonosítottam a folyáshatárra ( $R_{p0,2}$  (MPa)), a szakítószilárdságra ( $R_m$  (MPa)), valamint az alakváltozásra ( $\varepsilon$  (%)) hatást gyakorló pórusjellemzőket [12]. A pórusoknak a próbatest keresztmetszetén való elhelyezkedését is vizsgáltam egy általam kifejlesztett paraméterrel (CSC (-)), amivel jellemezhető a repedés kialakulásának kockázata. A gépi tanulás módszere a tudományos munkákban egyre elterjedtebb [13–21], ugyanakkor ezen a kutatási területen még nem alkalmazták.

Az elért eredmények a pórus- illetve mechanikai jellemzők közötti mennyiségi megállapítások gazdagításán túl az öntvények minősítő módszereinek fejlesztéséhez járulnak hozzá, ugyanis a pórusszerkezet alapján a mechanikai tulajdonságok roncsolással járó vizsgálat nélkül becsülhetők, illetve a törés lokalizálható.

## 2 Tudományos nyitott kérdések

A szakirodalom feldolgozása során összefoglaltam a különböző szerkezetvizsgálati módszerek – mind pozitív, mind negatív – jellemzőit, mely eljárások alkalmasak az öntvények pórusszerkezetének jellemzésére, amiket szintén bemutattam. Ezután összegeztem azokat a kutatási eredményeket, melyek a pórusok egyes jellemzőinek hatását írták le az öntvények mechanikai tulajdonságaira, ám a megállapítások csak kétváltozós összefüggésekre vonatkoztak. A kutatómunka újdonsága, hogy az összefüggéseket többváltozós regresszióval is fel kívánom tárni, melynek a vonatkozó módszerét is bemutattam. Tehát a szakirodalom feldolgozás egyik vonulata a szerkezetvizsgálati módszerek jellemzése és összehasonlítása az öntvények pórusszerkezetének megfelelő vizsgálati módszereinek kiválasztására, míg a másik a pórusszerkezet és a tönkremenetel kapcsolatának feltárása.

A szakirodalmi áttekintés alapján megállapítottam a bennük található ellentmondásokat és hiányosságokat, melyeket alább sorolok fel:

1. A szakirodalomban bemutatott különböző szerkezetvizsgálati módszerekkel meghatározható porozitás mennyisége eltérő, ugyanis azt a módszerek tulajdonságai, valamint az anyag pórusszerkezete befolyásolja.
2. A kutatások során nem vizsgálták egzakt módon a pórusok keresztmetszeti elhelyezkedését a próbatestek felületéhez képest, annak ellenére, hogy ennek fontosságát kiemelték.
3. A szakirodalomban nem vizsgálták a kétdimenziós keresztmetszeti pórusjellemzők hatását.
4. A szakirodalomban előfordult a kiugró értékek elhagyása, ami növelte a korrelációs együttható értékét. Ennek a módszernek az alkalmazása megkérdőjelezhető. A kiugró értékek elhagyásának módszertanával kapcsolatban különös figyelemmel kell eljárni.
5. A szerzők munkáit tekintve nincs egyetértés abban, hogy melyik pórusjellemző(k) alapján becsülhető a tönkremenetel helye a szakítóvizsgálatok előtt.
6. Ehhez kapcsolódóan nem található olyan kutatómunka sem, amely átfogóan mutatja be a pórusjellemzők hatását a mechanikai tulajdonságokra. Nincs egységes konklúzió, hogy milyen módon befolyásolják a pórusjellemzők a szakadási nyúlást.
7. A kutatásokban a pórus-, illetve a mechanikai jellemzők kapcsolatának vizsgálatára csak kétváltozós elemzéseket alkalmaztak.
8. A megfigyelt eredmények interpretálását nehezíti a vizsgált ötvözetek anyagminőségének és öntéstechnológiáinak sokszínűsége, így a létrejövő pórusszerkezet struktúrája (mennyisége, mérete, eloszlása), illetve szövetszerkezete. Ezek jelentősen eltérhetnek egymástól, így befolyásolva a mechanikai tulajdonságokat és a tönkremenetel módját.

A szakirodalom feldolgozása alapján az alábbi tudományos nyitott kérdéseket fogalmaztam meg:

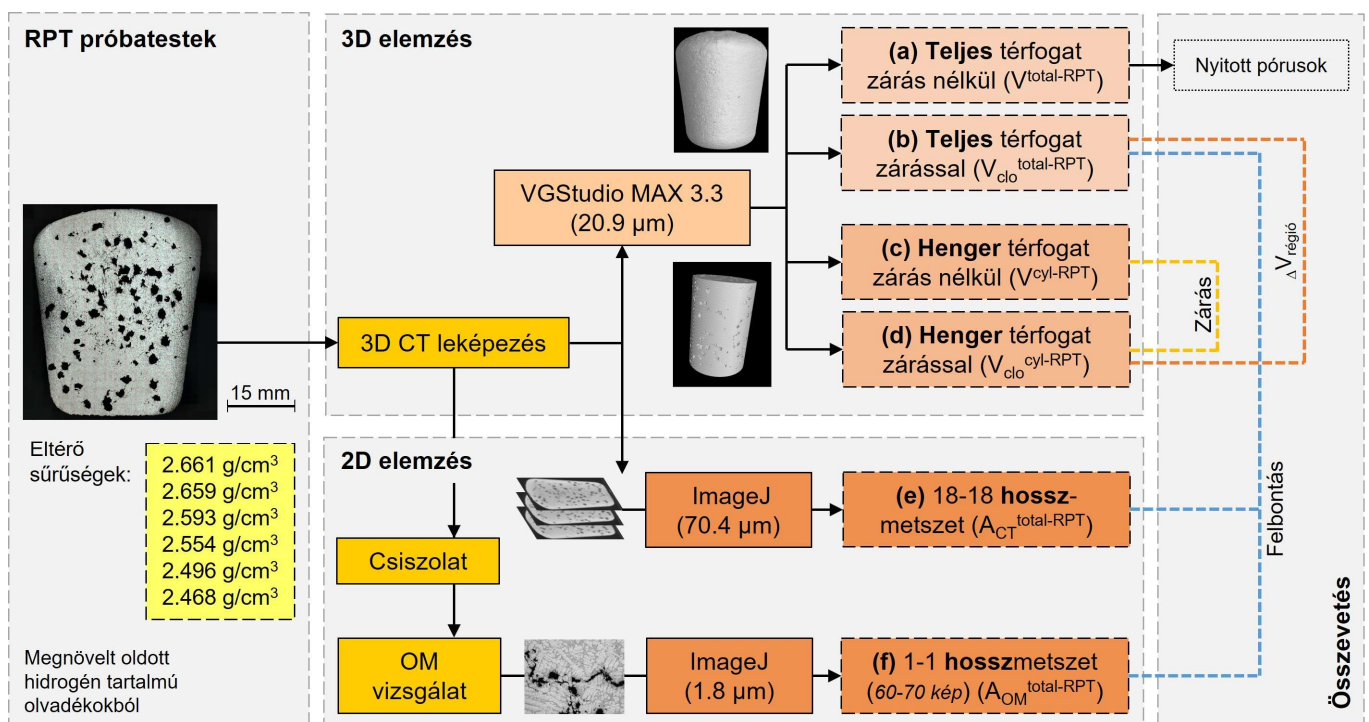
1. Kérdés: Az egyes képalkotó módszerek (OM, 2D CT, 3D CT) alkalmazásának milyen előnyei és korlátjai vannak? Milyen kapcsolat van a módszerekkel meghatározott porozitás értékek között?
2. Kérdés: A mechanikai tulajdonságok és a pórusszerkezet közötti kapcsolatok feltárására melyik módszert (OM, 2D CT, 3D CT) célszerű alkalmazni?
3. Kérdés: A mechanikai tulajdonságok szempontjából a pórusok próbatest keresztmetszetén való elhelyezkedésének milyen jelentősége van és ezt hogyan lehet jellemezni?
4. Kérdés: A két- és háromdimenzióban meghatározott pórusjellemzők milyen kapcsolatban állnak a mechanikai tulajdonságokkal és milyen repedésképző szerepük van?
5. Kérdés: Többváltozós regressziós elemzéssel milyen összefüggések állapíthatók meg a pórus-, illetve a mechanikai jellemzők között?

### 3 Csökkentett nyomáson dermedő próbák porozitása

A kutatómunka során meg kívántam határozni, hogy melyik szerkezetvizsgálati módszer a legmegfelelőbb a továbbiakban vizsgált öntvények pórusszerkezetének vizsgálatára. A szakirodalomban bemutatott módszereket (3D CT, 2D CT, OM) jellemeztem és összehasonlítottam. Meghatároztam azok előnyeit, korlátjait, illetve, hogy a különböző próbatestek eltérő szerkezetét mely módszerekkel lehet jellemezni a legpontosabban. A vizsgálatokhoz eltérő mennyiségű oldott hidrogént tartalmazó,  $\text{AlSi7MgCu0,5}$  ötvözetből öntött csökkentett nyomáson dermedő (RPT) próbákat használtam.

#### 3.1 Elvégzett vizsgálatok

Az elvégzett vizsgálatok folyamatát az 1. ábra mutatja be, ahol látható, hogy az eredmények között különböző aspektusokból vontam párhuzamot.



1. ábra: A csökkentett nyomáson dermedő próbákon végzett vizsgálatok, valamint a meghatározott porozitás eredmények összehasonlításának módjai: a felbontás, a morfológiai transzformáció (zárás) és a vizsgált térfogat (régió) méretének hatása ([8] nyomán).

Az YXLON FF35 típusú  $\mu$ -CT-vel készített 3D-s felvételek elemzését elvégezve láthatóvá vált a különböző oldott hidrogén tartalmú olvadékokból öntött és csökkentett nyomáson szilárdult próbatestek belső pórusszerkezete, melyek a próbatestek felületére kifutó nyitott csatornákat tartalmaztak, így a mért porozitás eredmények nem voltak értékelhetőek.

Ennek kiküszöbölésére morfológiai transzformációt (zárást) [22–25] hajtottam végre. A pórusokat összekötő csatornákat ezzel a módszerrel lezártam, ami öt lépésben az alumínium ötvözet fázisának dilatációját, majd ismét öt lépésben az erózióját jelenti. Az átalakítás után zárt pórusszerkezet jött létre, a pórusok nem, vagy csekély mértékben érintkeztek a próbatest környezetével, így a porozitás mennyiségét (térfogatarányát) meg lehetett határozni a teljes térfogatban ( $V_{V, \text{clo}}^{\text{total-RPT}}$ ). A 3D-s CT felvételek kiértékelése során a legkisebb pórustérfogat,

amit figyelembe vettem,  $0,001 \text{ mm}^3$  volt. Az 1. ábrán túl az 1. táblázatban összefoglaltam a vizsgálati módszerek (3D CT, 2D CT, optikai mikroszkópia (OM)) főbb jellemzőit.

1. táblázat: A porozitás meghatározására alkalmazott két- és háromdimenziós vizsgálatok főbb jellemzői ([8] nyomán).

| Jellemzők                     | 3D CT felvételek elemzése                                                                                                                                                                                     | 2D CT felvételek elemzése                                  | OM felvételek elemzése                  |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Elemzett régió méretváltozása | Vizsgált                                                                                                                                                                                                      | Nem vizsgált                                               | Nem vizsgált                            |
| Képtárolás típusa             | Adaptív Gauss típusú szűrés, majd<br>- $V_{\text{clo}}^{\text{total-RPT}}$ : 5-5 lépésben;<br>- $V_{\text{cyl-RPT}}$ : zárás nélkül;<br>- $V_{\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}$ : 5-5 lépésben, végül detektálás. | Adaptív Gauss típusú szűrés, majd zárás nélkül detektálás. | Szürkekép átalakítás nélkül detektálás. |
| A mért pórusjellemző          | $V_V$ (%)                                                                                                                                                                                                     | $A_A$ (%)                                                  | $A_A$ (%)                               |

Mivel a morfológiai transzformációs folyamat csökkenti a pórusok térfogatát, így ennek hatását, valamint szerkezetvizsgálati alkalmazhatóságát is tanulmányozni kívántam (*ami kutatás közben felmerült nyitott kérdés*). Ehhez a próbatestek **belső hengeres**, virtuálisan kivágással módosított térfogatát vizsgáltam a pórusszerkezet morfológiai transzformációjával ( $V_{\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}$ ), illetve anélkül ( $V_{\text{cyl-RPT}}$ ) (1. ábra, illetve 1. táblázat). A két módszerrel történő elemzés eredményeit összehasonlítottam annak érdekében, hogy képet kapjak a transzformáció után detektálható pórusmennyiség változásáról, ami jellemzi a pórusok összetettségét is. Ugyanis mivel a zárás a fázisok felületén megy végbe, konvex morfológia esetén a változás kisebb, míg konkáv szerkezet esetén ez a változás jelentősebb [26].

Emellett mivel a vizsgált régiók mérete és helye befolyásolja a detektálható porozitást [27–31], ezért a térfogatmódosítás hatását és szerkezetvizsgálati alkalmazhatóságát (*ami szintén kutatás közben felmerült nyitott kérdés*) is vizsgáltam a  $V_{\text{clo}}^{\text{total-RPT}}$  és  $V_{\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}$  térfogatokat összehasonlítva (1. ábra, illetve 1. táblázat).

### 3.2 Eredmények összefoglalása

Az öntészeti iparban az oldott hidrogéntartalom meghatározására a sűrűségmérés módszerét használják, míg a minőségellenőrzéshez és a technológiai fejlesztésekhez a porozitás vizsgálatára a metallográfia és a számítógépi tomográfia a leggyakrabban alkalmazott módszerek. A pórusszerkezet (méret, morfológia, eloszlás) befolyásolja az egyes módszerek alkalmazhatóságát. A disszertációnak ebben a részében a módszerek gyakorlati alkalmazhatóságát és mérési pontosságát hasonlítottam össze. Emellett vizsgáltam a morfológiai képtálcák és a vizsgált régió nagyságának hatását az eredményekre. Ezek alapján az alábbi következtetésekre jutottam [8]:

- i. Az **optikai mikroszkópos (OM) felvételek** elemzésével a kiváló ( $1,8\ \mu\text{m}$ ) felbontás miatt a CT felvételek felbontása ( $20,9\ \mu\text{m}$ ) körüli, illetve alatti méretű pórusok és póruscsatornák ( $D_{\text{csatorna vagy pórus}}^{\text{minimum}}$ ) megbízhatóan mérhetők. A próbatest felületére nyitott pórusok jelenléte nem jelent problémát a mérés pontossága szempontjából. Inhomogén (pórus-) eloszlás esetén időigényes metszetsorozat készítésével vizsgálható az eloszlás, valamint egyetlen metszeten belül is nagy mennyiségű képfeldolgozásra van szükség. A módszer hátrányát tehát az adja, hogy a pórusok térbelisége, pontos eloszlása nehezen vizsgálható.
- ii. A pórusok térbeliségét és az inhomogén póruseloszlást legjobban a **3D CT módszerrel** lehet értékelni, azonban az OM módszerhez képest kevésbé részletes felbontással. Amennyiben a próbatest felületére nyitott pórusok vannak jelen, az eljárás pontossága a nyitottság mértékétől függ. Ekkor alternatív megoldásra van szükség: virtuális térfogatmódosításra vagy morfológiai transzformációra, melyeket körültekintően kell alkalmazni.
- iii. A **2D CT módszerrel** a nagyobb pórusok és a vastagabb póruscsatornák ( $D_{\text{csatorna vagy pórus}}^{\text{minimum}} > 2 \times 70,4\ \mu\text{m}$ ) jól mérhetők, míg a kisebbek és vékonyabbak ( $D_{\text{csatorna vagy pórus}}^{\text{minimum}}: 70,4 - 2 \times 70,4\ \mu\text{m}$ ) kevésbé. A pórusok eloszlásának elemzése kevésbé időigényes ezzel a módszerrel, mint az OM-felvételek elemzésével, illetve a sorozatmetszetek készítése is egyszerűsödik.
- iv. A próbatest felületére nyitott pórusszerkezet esetében  $n$  számú mintában a legkisebb csatornavastagságok közül a legnagyobb vastagságával megegyező méretű póruscsatornák **morfológiai transzformációval** zárt pórusokká alakíthatók. A pórusok mennyisége, mérete és összetettsége befolyásolja az átalakítással bekövetkező – ám a vizsgálat szempontjából szükségszerű – póruscsökkenés mértékét. Minél összetettebb a pórusszerkezet – azaz minél nagyobb térfogatú tagolt pórusrészek egyre több, illetve keskenyebb összekötő csatornákon keresztül kapcsolódnak össze –, annál jelentősebb a pórustérfogat relatív csökkenése. Ezért a morfológiai transzformáció alkalmas a pórusszerkezetek összetettségének jellemzésére.
- v. A **vizsgált térfogat méretének változtatásával** jellemezhető a **pórusok eloszlása**: inhomogén póruseloszlás esetén a vizsgált térfogat méretének változtatása számottevő mértékben befolyásolja az eredményt (nagyobb a relatív porozitás változás), míg homogén póruseloszlás esetén a vizsgált térfogat méretváltoztatásának lényegesen kisebb a hatása.

## 4 Szakító próbatestek pórusszerkezete

Az ipari gyakorlatban a mechanikai tulajdonságok meghatározására szakítóvizsgálatokat végeznek, ám hogy közben hol következik be a repedés és milyen formában megy végbe a törés, az a szakítóvizsgálat előtt, előre nem megállapítható. Ezek alapján célszerű a teljes alakváltozó térfogatra vonatkozóan elvégezni a porozitás vizsgálatot, ugyanis a szakirodalommal összhangban [10, 32] általa nagyobb valószínűséggel lehet előre jelezni a tönkremenetel helyét és módját. A teljes alakváltozó térfogat vizsgálatára a **számítógépi tomográfia** kiváló módszer. A kutatómunka során a pórusszerkezet és a tönkremenetel, illetve a mechanikai tulajdonságok kapcsolatát vizsgáltam.

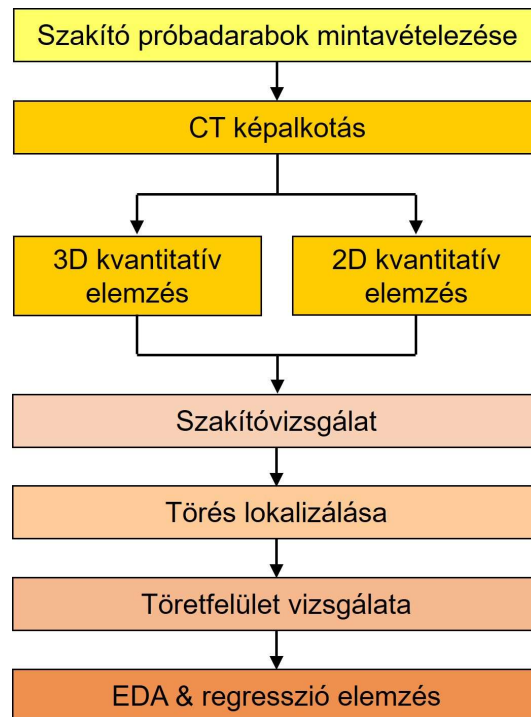
Kutatómunkám során összesen 48 darab, A356 ötvözetből (AlSi7Mg0,3) **ipari körülmények között alacsony nyomású öntéstechnológiával** (LPDC) előállított és T6 hőkezelt – összesen nyolc darab – **futómű alkatrészekből** kimunkált, s az ipari gyakorlatban **minőségellenőrzésre** használatos lapos szakító próbatestet vizsgáltam. Ezek közül (3D CT módszerrel meghatározva) az alakváltozó térfogatban a legalább 0,02% térfogati porozitást ( $V_V^{total} (\%)$ ) tartalmazó (ami a szakirodalomban vizsgált próbatestekhez képest egy nagyságrenddel kisebb porozitás tartalmú) próbatesteket – 24 darabot – választottam ki és vizsgáltam részletesen a kitűzött feladat végrehajtásához: a pórusszerkezet és a mechanikai tulajdonságok kapcsolatának vizsgálatára.

Az általam vizsgált öntvények **szimmetrikus** geometriájúak, melyből **jobb és baloldaltól is ugyanazon pozíciókból, de három eltérő régióból** munkálnak ki és vizsgálnak szakító próbatesteket (tehát öntvényenként összesen hat darabot) az ipari gyakorlatban. Ezek közül két régióban fémforma oldalfalai között történik a dermedés, viszonylag közel az olvadékok formába történő beömlési pontjához, valamint a harmadik régióban fémforma és homokmag oldalfalai között szilárdul az olvadék viszonylag távolabb a beömlési ponttól. Ennek ellenére **azonos szövetszerkezet alakul ki mind a hat régióban**. Minimális volt az eltérés az eutektikus szilícium mennyiségében (9-11%), méretében (5-6,2  $\mu m^2$ ) és morfológiájában (Circ<sub>eutSi</sub> 0,7 (-)), valamint a szekunder dendritág távolságában (17,4-18,8  $\mu m$ ) [33].

### 4.1 Elvégzett vizsgálatok

A kutatás célja **azoknak a pórusjellemzőknek a feltárása volt, amelyek hatással vannak a szakítóvizsgálattal meghatározható mechanikai tulajdonságokra**, ezáltal célszerű azokat az öntészeti ipari minőségellenőrzés során vizsgálni. Erre azért is szükség van, mert a jellemzők kapcsolatának leírása jelenleg is intenzív kutatások tárgya. A szakirodalomban nincs egyetértés az egyes jellemzők jelentőségét illetően. A kutatás során a térben és a töretfelületen meghatározható pórusjellemzőkön túl a szakirodalomban nem vizsgált kétdimenziós keresztmetszeti jellemzőket (pl. a pórus területarány ( $A_A (\%)$ ), vagy a legnagyobb területű pórus ( $A_{max} (mm^2)$ )) is vizsgáltam. Továbbá jellemeztem a pórusoknak a próbatest keresztmetszetén való elhelyezkedését (ún. CSC (-) paraméterrel). A pórus-, illetve a mechanikai jellemzők kapcsolatának vizsgálatára nemcsak kétváltozós elemzéseket – ahogyan a szakirodalomban is tették –, hanem prediktív adat-vezérelt, két- és többváltozós, lineáris, illetve nemlineáris regressziós modellezést is alkalmaztam. Az ipari körülmények között LPDC technológiával öntött öntvényekből kimunkált, az alakváltozó térfogatban legalább 0,02% térfogati porozitást ( $V_V^{total} (\%)$ ) tartalmazó 24 darab szakító próbatesten elvégzett, a pórusok

2D-s és 3D-s szerkezetének leírását célzó vizsgálatok folyamatát a 2. ábrán mutatom be. Az így meghatározott pórusjellemzők mechanikai tulajdonságokkal való kapcsolatának meghatározására feltáró adatelemzést (EDA) végeztem, majd végrehajtottam a regressziós modellezést gépi tanulás segítségével. Fontos kiemelni, hogy a kutatás nem konkrét matematikai összefüggések meghatározására irányult, hanem a releváns pórusjellemzők azonosítása volt a cél.

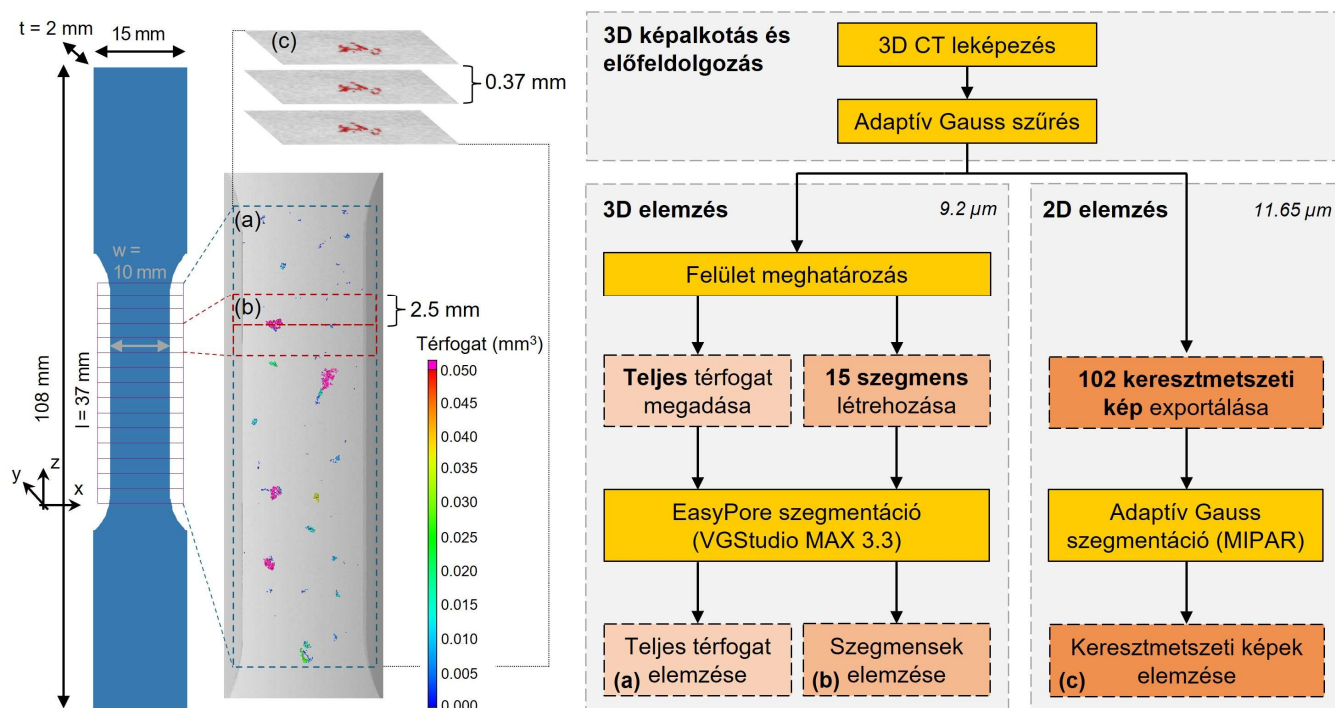


2. ábra: Az elvégzett vizsgálatok folyamatának bemutatása [12].

Az YXLON FF35 típusú  $\mu$ -CT-vel készített háromdimenziós felvételek elemzése során a legkisebb figyelembe vett pórustérfogat  $6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$  (8 voxel) volt. A szakító próbatest alakváltozó régióját (3. ábra (a)) „total” elnevezéssel láttam el, majd azt 15 szegmensre osztottam a pórusjellemzők eloszlásának és a szakítóvizsgálat után a törési szegmens ( $f\text{-sm}$ ) pórusjellemzőinek megállapítása céljából (3. ábra (b)). A vizsgálatok során a 2. táblázatban feltüntetett jellemzőket határoztam meg. Amennyiben a szakítóvizsgálat után a repedéssel érintett hosszanti szakasz nem egy, hanem két vagy három szegmenst is érintett, abban az esetben azt a szegmenst neveztem törési szegmensnek ( $f\text{-sm}$ ), melyben a  $V_v^{\text{sm}}$ ,  $S_v^{\text{sm}}$  és  $V_{\text{max}}^{\text{sm}}$  pórusjellemzők értéke a legnagyobb volt. A nem térfogategységre vonatkoztatott jellemzők esetén ( $V_{\text{max}}$ ,  $\text{Spher}_{V_{\text{max}}}$  és  $A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}$ ) azok teljes, a szegmensek határvonalával nem elmetezett értékeit dolgoztam fel. Ezen túl definiáltam, hogy a szegmensek és a teljes alakváltozó térfogatban az egyedi pórusok közül, nagyságrendi sorba rendezés után a törési szegmensben mért egyes pórusjellemzők értékei hol helyezkednek el a sorban. Ezután kiszámítottam, hogy a 24 próbatest esetén hány alkalommal ment végbe a tönkremenetel a legnagyobb, a második legnagyobb, illetve a harmadik legnagyobb értéknél. Ezzel a módszerrel a pórusszerkezeti tulajdonságok repedésképződésre gyakorolt hatása vizsgálható.

A pórusok 2. táblázatban látható keresztmetszeti jellemzőinek vizsgálatára próbatestenként 102 db kétdimenziós röntgentomográfiasorozatmetszetet nyertem ki (3. ábra

(c)). A repedéssel érintett metszetek közül azt a keresztmetszetet neveztem el törési keresztmetszetnek ( $f$ -cs), amelyen az  $A_A^{cs}$ ,  $L_A^{cs}$  és  $A_{max}^{cs}$  pórusjellemzők értéke a legnagyobb volt. Emellett szintén meghatároztam, hogy a metszetek közül a törési keresztmetszeten mért egyes pórusjellemzők esetében hány alkalommal ment végbe a tönkremenetel a legnagyobb, a második legnagyobb, illetve a harmadik legnagyobb értéknél. Bevezettem a repedés kialakulásának kockázatát jellemző, az ún. „Cross-section Classification” paramétert (CSC (-)), amivel osztályoztam a keresztmetszeten a pórusok elhelyezkedését aszerint, hogy a szakítóvizsgálat közben a felületről meginduló repedés kockázata mekkora.

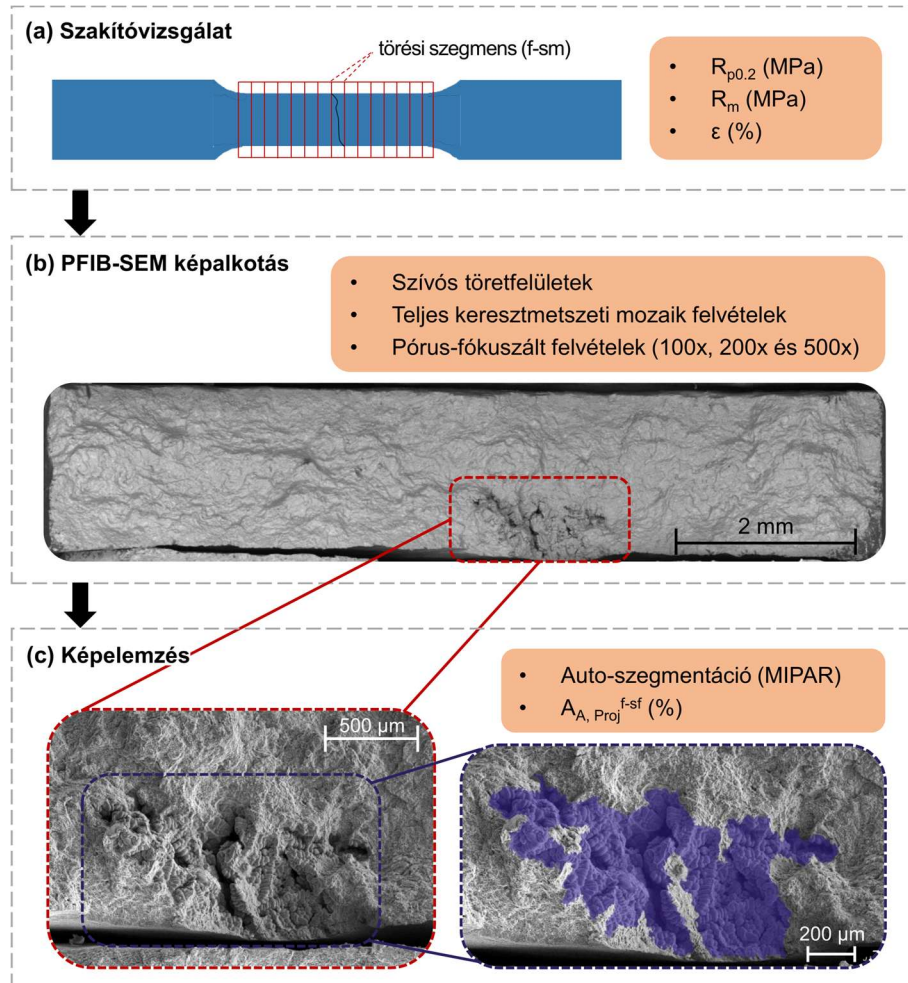


3. ábra: A szakító próbatestek méretei és a CT-felvételek elemzett régiói (az ábra bal oldalán), valamint a 3D-s és 2D-s képelemzési eljárások (az ábra jobb oldalán): (a) a teljes térfogat, b) a 15 szegmens, és c) a keresztmetszeti képek [12].

2. táblázat: A meghatározott pórusjellemzők a teljes térfogatban (*total*), a szegmensekben (*sm*), ahogyan a törési szegmensben ( $f$ -*sm*) is, valamint a keresztmetszeti (*cs*) felvételek és a törési keresztmetszeteken ( $f$ -*cs*) ([12] nyomán).

| A pórusok jellemzői a teljes térfogatban | A pórusok jellemzői a törési szegmensben | A jellemzők definíciója                                                                            | A pórusok jellemzői a törési keresztmetszeten | A jellemzők definíciója                   |
|------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $V_V^{total} (\%)$                       | $V_V^{f-sm} (\%)$                        | A pórusok térfogataránya.                                                                          | $A_A^{f-cs} (\%)$                             | A pórusok területaránya.                  |
| $S_V^{total} (mm^{-1})$                  | $S_V^{f-sm} (mm^{-1})$                   | A pórusok fajlagos felülete.                                                                       | $L_A^{f-cs} (mm^{-1})$                        | A pórusok fajlagos kerülete.              |
| $V_{max}^{total} (mm^3)$                 | $V_{max}^{f-sm} (mm^3)$                  | A legnagyobb térfogatú pórus.                                                                      | $A_{max}^{f-cs} (mm^2)$                       | A legnagyobb területű pórus.              |
| $A_{Proj, V_{max}}^{total} (mm^2)$       | $A_{Proj, V_{max}}^{f-sm} (mm^2)$        | A legnagyobb térfogatú pórus, mechanikai igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területe. |                                               |                                           |
| $Spherv_{max}^{total} (-)$               | $Spherv_{max}^{f-sm} (-)$                | A legnagyobb térfogatú pórus gömbszerűsége.                                                        | $Circ_{A_{max}}^{f-cs} (-)$                   | A legnagyobb területű pórus körszerűsége. |

A szakítóvizsgálatok egy Instron 5982 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezéssel történtek (4. ábra (a)). A szakítóvizsgálatok után megállapítottam a repedéssel érintett szegmens(ek)e)t és keresztmetszeteket. A töretfelületek ( $f\text{-}sf$ ) vizsgálata egy Helios G4 PFIB CXe (Thermo Scientific) plazmafókuszált ionsugaras pásztázó elektronmikroszkóppal (PFIB-SEM) történt (4. ábra (b)). A felületeken látható dendritközi pórusokat auto-szegmentációs algoritmmal vizsgáltam (4. ábra (c)). A felvételek felbontása a nagyítástól függően  $1,36\text{ }\mu\text{m}$  (100x),  $0,68\text{ }\mu\text{m}$  (200x) és  $0,27\text{ }\mu\text{m}$  (500x) volt, s meghatároztam a töretfelületen látható pórusok vetített területarányát ( $A_{A, Proj}^{f\text{-}sf}$ ) [34].

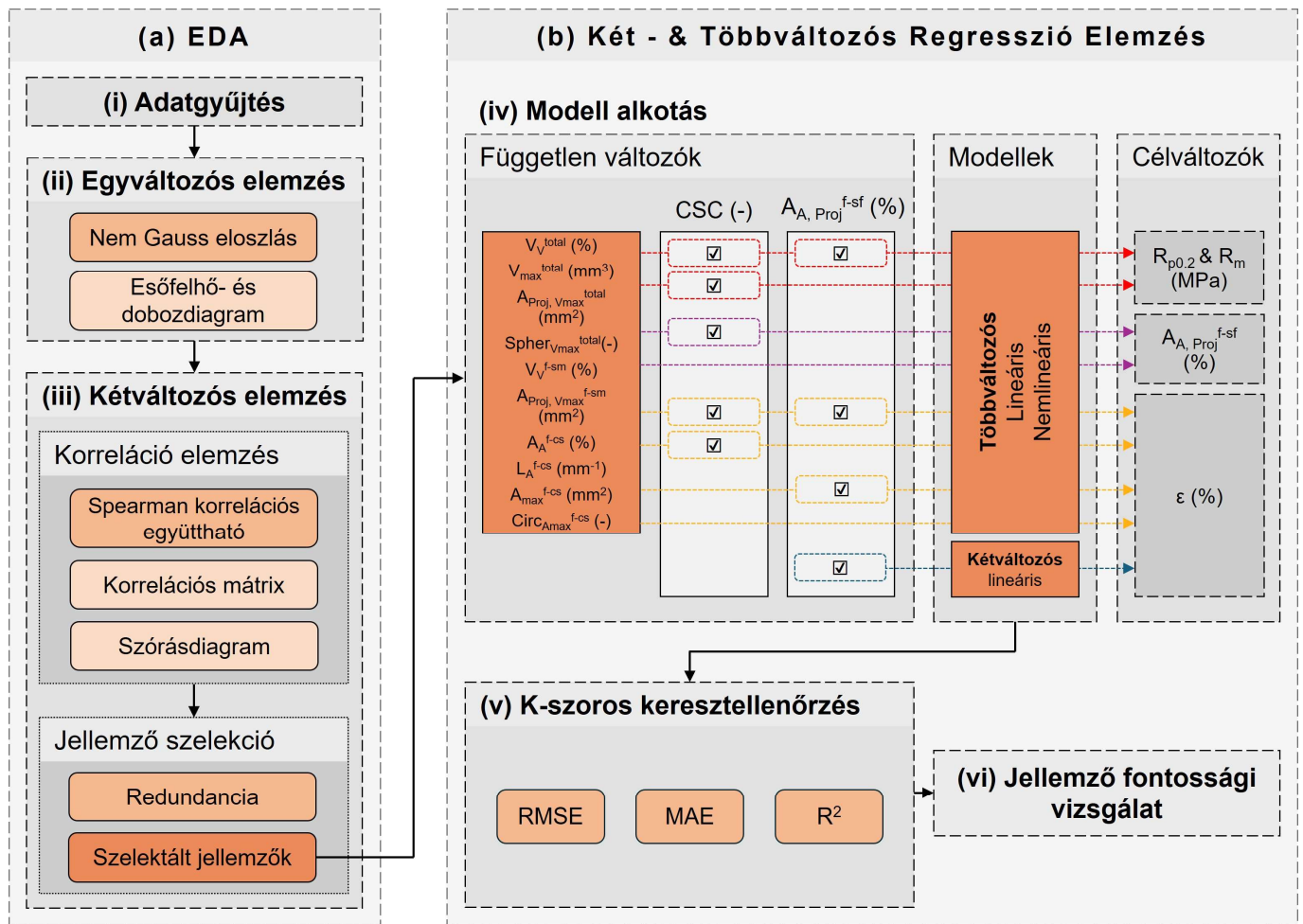


4. ábra: (a) A szakítóvizsgálatokat követően a töretfelületeket ( $f\text{-}sf$ ) két módon vizsgáltam – (b) a teljes keresztmetszetről mozaik, illetve (c) pórusfókuszált felvételek készültek, melyek képelemzése automatikus szegmentálási eljárással történt [12].

A pórusszerkezeti, illetve mechanikai jellemzőkön feltáró adatelemzést végeztem. Ezt követően prediktív adat-vezérelt modellezéssel megállapítottam a mechanikai tulajdonságok és a pórusjellemzők között lévő összefüggéseket. Az adatelemzés és a regressziós modellezés folyamatát az 5. ábra foglalja össze.

Az egyváltozós elemzések során megállapítottam, hogy több vizsgált jellemző ( $R_m$  (MPa),  $\varepsilon$  (%),  $A_{A, Proj}^{f\text{-}sf}$  (%),  $V_V^{total}$  (%),  $A_A^{f\text{-}cs}$  (%)) értékeinek eloszlása – vizuális megfigyelés útján meghatározva – nem normál eloszlású, így a kétváltozós összefüggések számszerűsítésére a Spearman korrelációs együtthatót ( $r_s$  (-)) alkalmaztam. A kétváltozós elemzések során a

determinációs együtthatókkal ( $r^2$  – *kisbetűvel írva*) jellemeztem a változók kapcsolatát. A korrelációs együtthatók alapján paraméter (jellemző) szelekciót hajtottam végre (5. ábra (iii)), aminek a célja a modellekhez használt független változók számának optimalizálása volt az erősen korrelált jellemzők elhagyásával, aminek segítségével a modellek összetettsége redukálható, hibája csökkenthető. Ennek folyamán négyvel ( $S_V^{total}$ ,  $S_V^{f-sm}$ ,  $V_{max}^{f-sm}$ ,  $Spher_{V_{max}^{f-sm}}$ ) csökkent a független változók száma. A prediktív adat-vezérelt modellezés (5. ábra (b)) során a **függő változók** a mechanikai jellemzők ( $R_{p0,2}$  (MPa),  $R_m$  (MPa), illetve  $\varepsilon$  (%)), valamint a töretfelületi porozitás ( $A_{A, Proj}^{f-sf}$  (%)) voltak, valamint a **független változók** azok a pórusjellemzők voltak, amelyeket a teljes alakváltozó térfogatban (*total*), a törési szegmensben (*f-sm*) és a törési keresztmetszeten (*f-cs*) határoztam meg, valamint a töretfelületi porozitás ( $A_{A, Proj}^{f-sf}$  (%)) és a törési keresztmetszeten a repedés kialakulásának kockázatát jellemző CSC (-) paraméter (5. ábra (iv)).



5. ábra: Az (a) feltáró adatelemzés során az adatgyűjtést követően (i) egyváltozós, illetve (ii) kétváltozós elemzéseket végeztem. Ezután a (b) prediktív adat-vezérelt modellezés során (iii) több modellt állítottam fel és értékeltem (iv) keresztellenőrzéssel, valamint (v) fontossági vizsgálattal értékeltem a független jellemzőket [12].

Összesen 9 regressziós modellt terveztem a függő és a független változók számától függően, különös figyelemmel az  $A_{A, Proj}^{f-sf}$  és a CSC jellemzőkre. A folyáshatár ( $R_{p0,2}$ ) és a szakítószilárdság ( $R_m$ ) vizsgálatok az  $A_{A, Proj}^{f-sf}$  -vel, illetve anélkül, míg a töretfelületi porozitás ( $A_{A, Proj}^{f-sf}$ ) vizsgálatok CSC-vel, illetve anélkül történt a modellezés. A nyúlás ( $\epsilon$ ) modellezése során több esetet is vizsgáltam:  $A_{A, Proj}^{f-sf}$  -vel, illetve anélkül, valamint CSC-vel és anélkül. A többváltozós modellek mellett kétváltozós lineáris regresszióval is vizsgáltam az  $A_{A, Proj}^{f-sf}$  és az  $\epsilon$  közötti összefüggést.

A modellek teljesítményét az RMSE és a MAE (illetve lineáris esetben az  $R^2$ -tel is) statisztikai mérőszámokkal írtam le (1-3), melyeket a **k-szoros keresztellenőrzéssel** (másnéven kereszt-validálással) határoztam meg (5. ábra (v)). Ez a módszer biztosítja, hogy noha a minta elemszáma kicsi (24 db), alkalmazásával a túlillesztés mérsékelhető. Így a gépi tanulás módszerével **kis adathalmazon is megfelelő** módon azonosíthatók a célváltozót befolyásoló lehetséges releváns független változók, ami pontosítja a szakirodalomban eddig alkalmazott kétváltozós statisztikai megközelítések eredményeit. Az RMSE-t az  $y$  szórására, míg a MAE-t az  $y$  értéktartományára normalizáltam ((4) és (5)) annak érdekében, hogy a különböző függő változókra végzett becslések eredményei összehasonlíthatóak legyenek. A többváltozós regresszioelemzés során az *XGBoost* [15, 35] – röviden XGB –, nemlineáris modellek bizonyultak a legjobbaknak. A modellek teljesítményértékelése mellett a független változók (pórusjellemzők) szerepét **permutáció-alapú paraméter fontossági vizsgálattal** (5. ábra (vi)) vizsgáltam, ahol  $k = 5$  volt. Segítségével meghatároztam, hogy mely pórusjellemzők függenek össze erőteljesen a függő változókkal, melyek befolyásolják azokat.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} (-) \quad (3)$$

ahol:

$y_i$ : a valós (mért) érték,

$\hat{y}_i$ : a becsült érték,

$\bar{y}$ : a valós (mért) értékek átlaga,

$n$ : az esetek száma,

$R^2$ : a lineáris regresszió elemzéssel meghatározott determinációs együttható (-).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{std(y)} (-) \quad (4)$$

$$NMAE = \frac{MAE}{y_{max} - y_{min}} (-) \quad (5)$$

ahol:

$std(y)$ : az  $y$  szórása,

$y_{max}$  és  $y_{min}$ : az  $y$  minimum és maximum értékei.

## 4.2 Eredmények összefoglalása

A kutatás célja a szakítóvizsgálattal meghatározható **mechanikai tulajdonságokat befolyásoló pórusjellemzők azonosítása** volt, valamint annak meghatározása, **mely jellemzők vizsgálata indokolt** az öntészeti ipari minőségellenőrzés során. A kutatómunka keretében összesen 48 darab – ipari körülmények között alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356 öntvényekből kimunkált és az ottani minőségellenőrzésre szolgáló – szakító próbatest közül a **legalább 0,02% térfogati porozitást ( $V_v^{total}$ ) tartalmazó (24 db) próbatestek** pórusszerkezete és mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolatot vizsgáltam. Ezt a szakirodalomban alkalmazott kétváltozós elemzéssel, valamint ezen a területen újnak minősülő gépi tanulással végzett többváltozós regressziós modellezéssel végeztem el. Az eljárás lehetővé tette **több pórusjellemző együttes hatásának feltárását** a mechanikai tulajdonságokra nézve. Emellett tanulmányoztam, hogy a pórusjellemzők milyen hatással vannak a szakító próbatestek tönkremenetelére, a kialakuló repedésekre. A pórusjellemzőket a teljes alakváltozó térfogatban és a 15 szegmensben, a töretfelületen ( $A_{A, Proj}^{f-sf}$ ), illetve a 102 db keresztmetszeten határoztam meg a 24 próbatestre vonatkozóan. A vizsgálatok eredményeit [12] az alábbiakban foglalom össze:

- i. A gépi tanulással végzett többváltozós regressziós modellezés – fontossági vizsgálattal elvégezve – alkalmas a kétváltozós elemzéssel meghatározott összefüggések pontosítására. A módszerrel egyértelműen kimutatható a pórusjellemzők (független változók) szerepe.
- ii. A folyáshatár és a porozitás között nincs közvetlen kapcsolat ( $r^2 = 0,17$ ), mely állítás összhangban van a szakirodalmi adatokkal, míg a szakítószilárdságra vonatkozó megállapítások részben egyeznek a szakirodalmi megállapításokkal. Ugyanis nemcsak a töretfelületi porozitás ( $A_{A, Proj}^{f-sf}$ ), hanem a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területe ( $A_{Proj, V_{max}}^{f-sm}$ ) is hatással van a szakítószilárdságra.
- iii. A szakadáshoz tartozó alakváltozásra a pórusoknak a törési keresztmetszeten való elhelyezkedését jellemző – az irodalomban nem szereplő, általam bevezetett – CSC paraméter és a töretfelületi porozitás ( $A_{A, Proj}^{f-sf}$ ) van számottevő hatással. Emellett az alakváltozó térfogat teljes porozitásának ( $V_v^{total}$ ), a törés vonalával érintett keresztmetszeten található legnagyobb mértékű porozitásnak ( $A_A^{f-cs}$ ), illetve a törési szegmensben lévő legnagyobb térfogatú pórus vetített területe ( $A_{Proj, V_{max}}^{f-sm}$ ) is szerepet játszik a szakadási nyúlás változásában.
- iv. A töretfelületi porozitást az irodalomban nem vizsgálták. Megállapításaim alapján a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területe ( $A_{Proj, V_{max}}^{f-sm}$ ), a törés vonalával érintett keresztmetszetek közül a legnagyobb pórus-területarány ( $A_A^{f-cs}$ ) és a törési szegmensben lévő pórusok térfogataránya ( $V_v^{f-sm}$ ) befolyásolja azt.
- v. A szakítóvizsgálat során a teljes alakváltozó térfogat első három legnagyobb térfogatú pórusának és legnagyobb (az alakváltozás irányára merőleges síkban mérhető) vetített területű pórusának van leginkább repedésképző hatása összességében a próbatestek 75-75%-ában (a két halmaz nem teljesen fedi át egymást). E-két jellemző három legnagyobb értékének egyikénél következett be a tönkremenetel. Ilyen jellegű

megállapítás nem található a szakirodalomban, ezért ennek kiemelkedő szerepe van az öntészeti ipar minőségellenőrzési módszertanának kialakítása szempontjából.

- vi. Az irodalomban kevésbé hangsúlyos, hogy a mechanikai tulajdonságok, illetve a repedés keletkezése és a pórusszerkezet között meghatározott összefüggések érvényességi tartományát a vizsgált próbatestekben előforduló pórusok mennyiségi intervalluma és eloszlása határozza meg. Az általam vizsgált alacsony nyomású technológiával az iparban előállított öntvényekből kimunkált próbatestekben a pórusok eloszlása véletlenszerű volt, illetve a 24 próbatestre nézve az alakváltozó térfogatban a legnagyobb térfogatú pórus  $0,01\text{--}0,19\text{ mm}^3$ , míg a térfogati porozitás  $0,02\text{--}0,10\%$  volt. Így a megállapítások az ipari technológiára és az alkalmazott minőségellenőrzésre érvényesek a vizsgált pórusjellemzők értelmezési tartományán belül.

## 5 Tézisek

A disszertációban bemutatott kutatómunka eredményei és következtetései alapján az alábbi új tudományos téziseket fogalmaztam meg:

### 1. Tézis

Az ipari gyakorlatban az alumínium olvadékok oldott hidrogéntartalmának meghatározására szolgáló,  $\text{AlSi7MgCu0,5}$  ötvözetből, különböző oldott hidrogén tartalmú olvadékból (így eltérő mennyiségű porozitást tartalmazó) öntött csökkentett nyomáson (80 mbar) dermedő próbák (RPT) pórusszerkezetének vizsgálatával az irodalomban eddig nem szereplő összehasonlító módszert fejlesztettem ki. Ennek lényege, hogy a különböző vizsgálati eljárásokkal (3D CT, 2D CT és OM) szisztematikusan mérhető a porozitás térfogataránya és területaránya, illetve a 3D-s pórusszerkezet (morfológiai jellemzői és eloszlása). Ezeket összehasonlítva megállapítható a módszerek alkalmazhatóságának feltételei:

- a) Az **optikai mikroszkópos (OM) felvételek** elemzésével a kiváló felbontás ( **$1,8\text{ }\mu\text{m}$** ) miatt a **kisebb** pórusok és vékonyabb póruscsatornák ( $D^{\text{minimum}}: 70,4 - 2 \times 70,4\text{ }\mu\text{m}$ ) **megbízhatóan** mérhetők, ám **inhomogén** eloszlás esetén csak **időigényes** metszetsorozatok készítésével és nagy mennyiségű képfeldolgozással vizsgálható a pórusszerkezet (T1.a. táblázat és T1.a. ábra). A módszer további hátránya, hogy a pórusok **térbeli** méretei, morfológiája és pontos eloszlása **nehezen vizsgálható**.

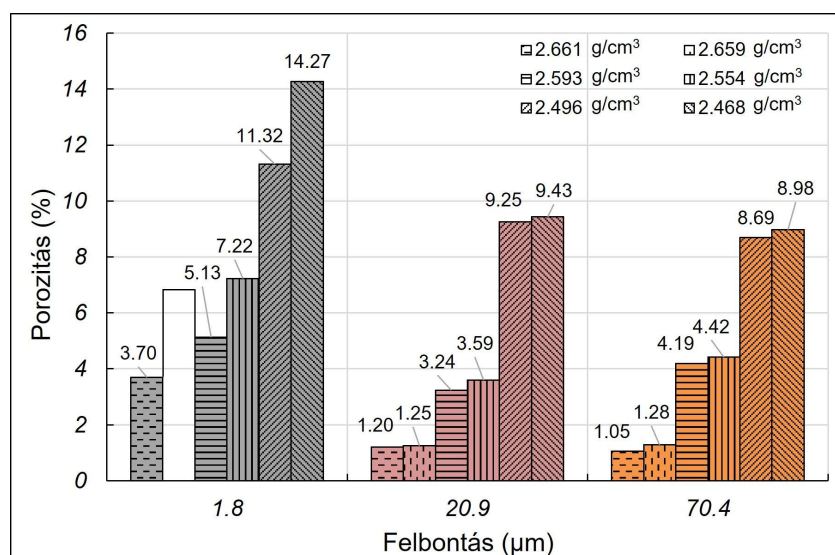
A pórusok térbeli méreteit, morfológiáját és pontos eloszlását (így az inhomogén póruseloszlást is) legjobban a **3D CT módszerrel** lehet értékelni, azonban kevésbé részletes felbontással ( **$20,9\text{ }\mu\text{m}$** ). Amennyiben a **próbatess felületére nyitott pórusok** vannak jelen, a 3D CT eljárás pontossága a **nyitottság mértékétől**, azaz a próbatess felületére kifutó póruscsatorna minimális átmérőjétől ( $D_{\text{csatorna}}^{\text{minimum}}\text{ (}\mu\text{m})$ ) **függ**. Ekkor alternatív megoldásra van szükség: a vizsgált régió méretének csökkentésére vagy morfológiai transzformációra ( $D_{\text{csatorna}}^{\text{minimum}} = 2 \text{ voxel} \times \text{zárási ciklusszám (-)}$ ), amelyek értékelésekor figyelembe kell venni, hogy a kapott eredményeket az átalakítás módosítja.

A **2D CT módszerrel** az exportált felvételek felbontásának megfelelően ( **$70,4\text{ }\mu\text{m}$** ), a vastagabb póruscsatornák és nagyobb különálló pórusok ( $D^{\text{minimum}} > 2 \times 70,4\text{ }\mu\text{m}$ ) két

dimenzióban vizsgálhatóak, míg a tőlük vékonyabbak és kisebbek ( $D_{\text{minimum}}: 70,4 - 2 \times 70,4 \mu\text{m}$ ) kevésbé. A pórusok eloszlásának elemzése **kevésbé időigényes**, mint az optikai mikroszkópos felvételek elemzésével, ugyanis a sorozatmetszetek készítése **egyszerűsödik**. Ez az eljárás **hatékonyabban alkalmazható** kétdimenziós adatok kinyerésére, mint az OM módszer.

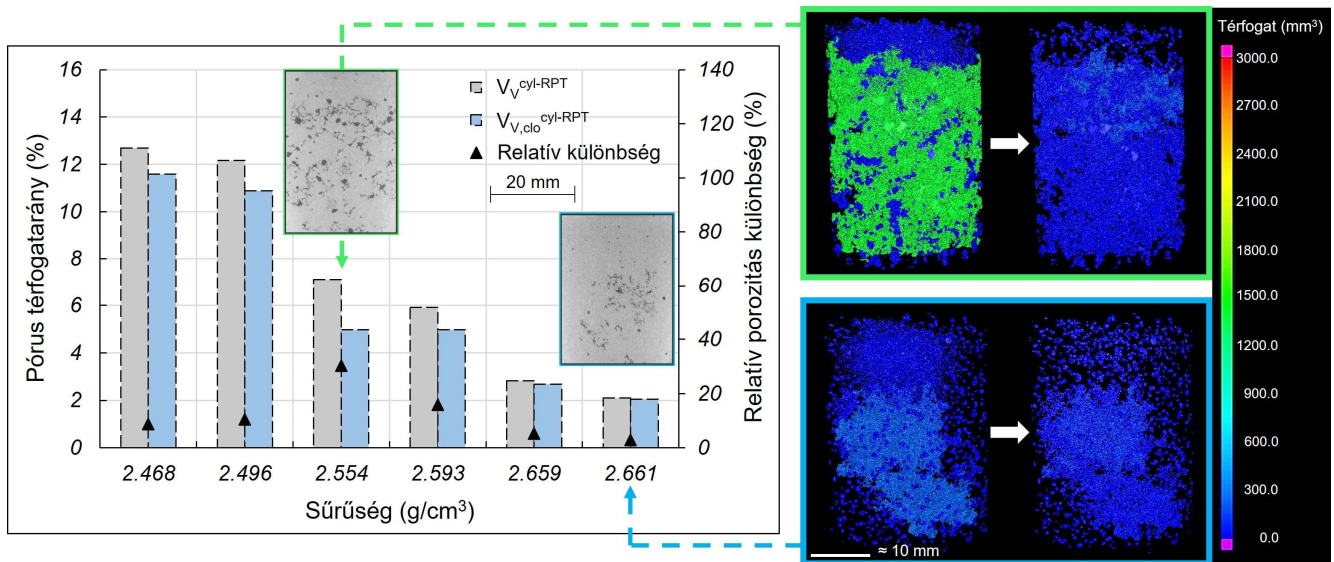
**T1.a. táblázat:** A különböző típusú pórusszerkezetek vizsgálati lehetőségeinek értékelése az egyes módszerek adottságai (aktuális felbontása, térbelisége), valamint a pórusok szerkezete (póruscsatorna mérete, pórusok eloszlása és a csatornák nyitottsága) alapján.

| Pórusszerkezet                                                                                        | 3D CT módszer<br>20,9 $\mu\text{m}$ felbontás esetén                              | 2D CT módszer<br>70,4 $\mu\text{m}$ felbontás esetén | OM módszer<br>1,8 $\mu\text{m}$ felbontás esetén |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Vékony póruscsatornás pórusok ( $D_{\text{minimum csatorna}}: 70,4 - 2 \times 70,4 \mu\text{m}$ )     | Mérhető                                                                           | Kevésbé mérhető                                      | Megbízhatóan mérhető                             |
| Vastag póruscsatornás pórusok ( $D_{\text{minimum csatorna}} > 2 \times 70,4 \mu\text{m}$ )           | Megbízhatóan mérhető                                                              | Mérhető                                              | Megbízhatóan mérhető                             |
| Kicsi, különálló pórusok ( $D_{\text{minimum pórus}}: 70,4 \mu\text{m} - 2 \times 70,4 \mu\text{m}$ ) | Mérhető                                                                           | Kevésbé mérhető                                      | Megbízhatóan mérhető                             |
| Nagy, különálló pórusok ( $D_{\text{minimum pórus}} > 2 \times 70,4 \mu\text{m}$ )                    | Megbízhatóan mérhető                                                              | Mérhető                                              | Megbízhatóan mérhető                             |
| Inhomogén póruseloszlás                                                                               | A módszer térbelisége miatt megbízhatóan mérhető                                  | Sorozatmetszetekkel mérhető                          | A csiszolatkészítés miatt kevésbé mérhető        |
| Nyitott pórusszerkezet (térfogatmódosítás nélkül)                                                     | A próbatest felületére kifutó póruscsatorna minimális átmérőjétől függően mérhető | Nincs hatása, ezért megbízhatóan mérhető             | Nincs hatása, ezért megbízhatóan mérhető         |



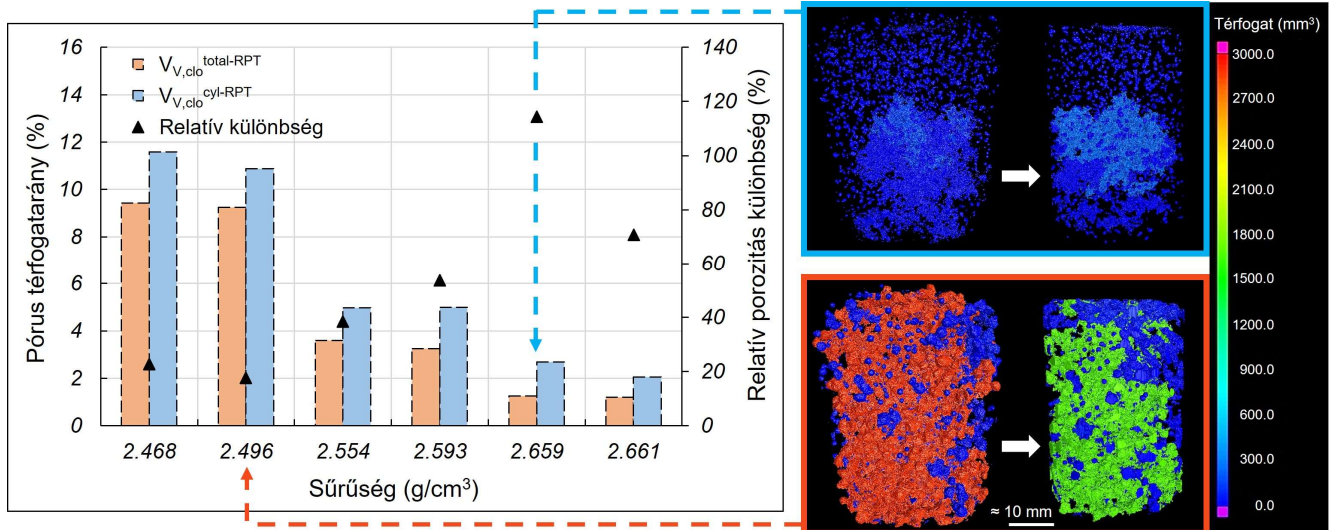
**T1.a. ábra:** A különböző sűrűségű csökkentett nyomáson dermedő (RPT) próbatestekben található pórusok térfogat-, illetve területaránya a vizsgálati módszerek felbontásának függvényében: 1,8  $\mu\text{m}$  – OM; 20,9  $\mu\text{m}$  – 3D CT ( $V_{\text{clo}}^{\text{total-RPT}} (\text{mm}^3)$  térfogaton mérve); 70,4  $\mu\text{m}$  – 2D CT módszer.

b) Póruscsatornákat tartalmazó minták 3D-s CT felvételén elvégzett,  $n$  számú (-) mintában a legkisebb csatornavastagságok (azaz a legkisebb minimális átmérők ( $D_{csatorna}^{minimum} (\mu m)$ )) közül a legnagyobb vastagságának megfelelő ciklusú (vastagság  $(\mu m) = 2 \text{ voxel} \times \text{zárás ciklusszám} (-)$ ) **morfológiai transzformáció hatására** bekövetkező **pórusmennyiség változás** alkalmas a pórusszerkezetek **összetettségének** (csatornák vastagságának) **jellemzésére: minél összetettebb**, azaz minél nagyobb térfogatú tagolt pórusrészek egyre több, illetve keskenyebb összekötő csatornákon keresztül kapcsolódnak össze, **annál jelentősebb a pórustérfogat csökkenése**. Ezt csökkentett nyomáson dermedő próbák (RPT) vizsgálati eredményei igazolták (T1.b. ábra). Ugyanis 5 ciklusú morfológiai transzformáció hatására bekövetkező relatív porozitás változásban ( $\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT} (\%)$ ) számottevő eltérés volt tapasztalható: az összetettebb pórusokat tartalmazó próbatestben ( $2,554 \text{ g/cm}^3$ ) a porozitás csökkenés jelentősebb volt ( $\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT} = 30,20\%$ ), mint a kevésbé összetett pórusokat tartalmazó próbatest ( $2,661 \text{ g/cm}^3$ ) esetén ( $\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT} = 2,81\%$ ).



**T1.b. ábra:** A mért pórus térfogatarány ( $V_V (\%)$ ) és a morfológiai transzformáció (zárás) hatására bekövetkező relatív porozitás különbség ( $\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT} (\%)$ ).

c) A 3D CT módszerrel vizsgált térfogat méretének változtatásával jellemezhető a **pórusok eloszlása: inhomogén** póruseloszlás esetén a vizsgált térfogat méretének változtatása **számottevő** mértékben befolyásolja az eredményt, míg **homogén** póruseloszlás esetén a vizsgált térfogat méretváltoztatásának lényegesen **kisebb** a hatása. Ezt csökkentett nyomáson dermedő próbák (RPT) vizsgálati eredményei igazolták (T1.c. ábra). Ugyanis a vizsgált teljes térfogat méretét 55-62%-ra csökkentve inhomogén póruseloszlás ( $2,659 \text{ g/cm}^3$ ) esetén jelentősen ( $\Delta_{rel} V_V^{vol-eff, RPT} = 114,4\%$ ), míg homogén póruseloszlás esetén kisebb mértékben ( $\Delta_{rel} V_V^{vol-eff, RPT} = 17,62\%$ ) változott a relatív porozitás különbség. **Ezzel a módszerrel a próbatestekben található porozitás homogén/inhomogén jellege számszerűen jellemezhető.**



**T1.c. ábra:** A mért pórus térfogatarány ( $V_V$  (%)) és a vizsgált térfogat méretváltozásának hatására bekövetkező relatív porozitás különbség ( $\Delta_{\text{rel}} V_V^{\text{vol-eff, RPT}}$  (%)).

## 2. Tézis

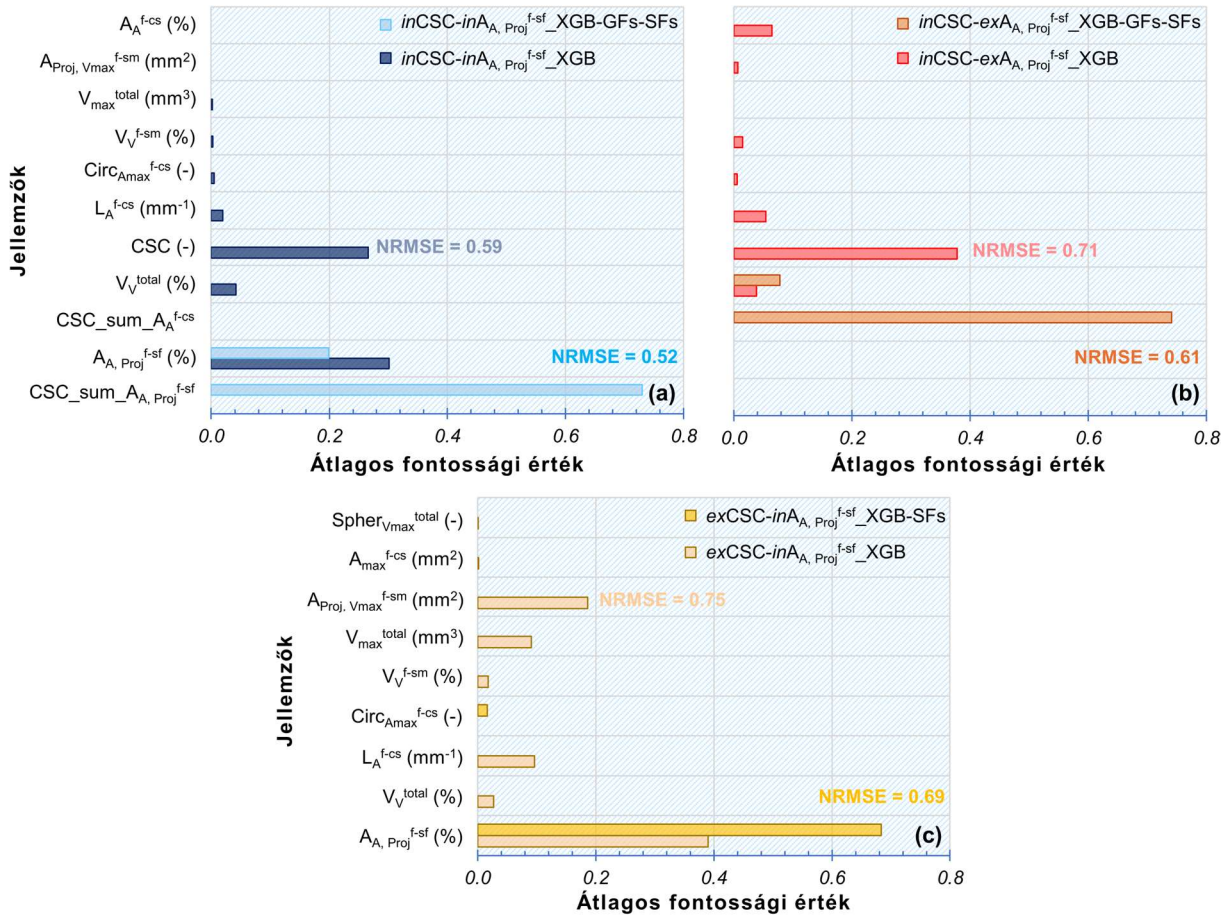
Ipari körülmények között **alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356** öntvényekből kimunkált szakító próbatestek segítségével a mechanikai tulajdonságok ( $R_{p0,2}$  (MPa),  $R_m$  (MPa),  $\varepsilon$  (%)) és a 3D CT, illetve a 2D CT módszerrel jellemzett pórusszerkezet kapcsolatát többváltozós regressziós modellezéssel (XGBoost algoritmusokkal) vizsgálva **bevezettem** a szakirodalomban nem szereplő **CSC** (*Cross-Section Classification* (-)) paramétert. Ezzel a paraméterrel **a pórusok**, 2D CT módszerrel meghatározható, törési keresztmetszeten ( $f$ -cs) való **elhelyezkedése osztályozható**, ami alkalmas a felületről meginduló **repedés kockázatának jellemzésére**, valamint **a szakadási nyúlásra ( $\varepsilon$  (%)) jelentős hatást gyakorol**. A CSC paraméter definíciója az alábbi:

- CSC = 1, ha nincs pórus a törési keresztmetszeten,
- CSC = 2, ha a törési keresztmetszet belső részén fordul elő porozitás, ami a teherviselő keresztmetszetet csökkenti, ezért a repedés kialakulásának kockázatát növeli,
- CSC = 3, ha a törési keresztmetszet külső részén (amit a próbatest felületétől maximálisan 0,20 mm mély rétegvastagságban definiáltam, ami a próbatest vastagságának a 10%-a) fordul elő a pórusoknak bármely pontja, ami a terhelt keresztmetszetet csökkenti, valamint a repedés kialakulásának kockázatát tovább növeli a felületi és/vagy felülethez közeli elhelyezkedése miatt,
- CSC = 4, ha a törési keresztmetszet külső és belső részén is előfordulnak pórusok így ebben az esetben a repedés kialakulását fokozó hatások erősítik egymást.

### 3. Tézis

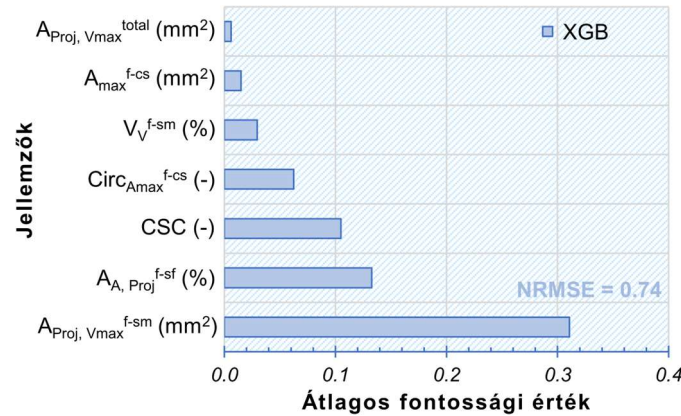
Ipari körülmények között alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356 öntvényekből kimunkált szakító próbatestek – 2D CT, illetve 3D CT módszerekkel jellemzett – pórusszerkezetének, töretfelületi porozitásának ( $A_{A, Proj}^{f-sf}$  (%)), valamint mechanikai tulajdonságainak ( $R_m$  (MPa),  $\varepsilon$  (%)) kapcsolatát gépi tanulással támogatott, paraméter fontossági vizsgálattal (*Feature Importance*) végzett többváltozós nemlineáris regressziós modellezés segítségével (XGBoost algoritmusokkal) elemezve azonosíthatóak azok a pórusjellemzők, amelyek befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat.

a) A **szakadási nyúlást** ( $\varepsilon = 4,8–14,80\%$ ) a töretfelületi porozitás ( $A_{A, Proj}^{f-sf} = 0,0–6,23\%$ ), valamint az általam bevezetett **CSC** paraméter ( $CSC = 2, 3$  vagy  $4$  (-)) befolyásolja jelentősen. Emellett az alakváltozó térfogat teljes térfogati porozitása ( $V_V^{total} = 0,02–0,10\%$ ), a törési keresztmetszet porozitása ( $A_A^{f-cs} = 0,04–0,86\%$ ) és a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának az igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területe ( $A_{Proj, Vmax}^{f-sm} = 0,04–0,85 \text{ mm}^2$ ) is szerepet játszik a szakadási nyúlás változásában (T3.a. ábra).



**T3.a. ábra:** A többváltozós regressziós modellezéssel (nemlineáris alap XGBoost (XGB), illetve *Selected features* (SFs) és *Golden Features* (GFs) modellekkel) kapott eredmények a független változók szerepét mutatják. Az  $A_{A, Proj}^{f-sf}$  (%),  $CSC$  (-),  $V_V^{total}$  (%),  $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$  ( $\text{mm}^2$ ) és  $A_A^{f-cs}$  (%) jellemzők befolyásolják leginkább a szakadási nyúlást ( $\varepsilon$  (%)): (a)  $inCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$ , (b)  $inCSC-exA_{A, Proj}^{f-sf}$  és (c)  $inCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$  modell konstrukció.

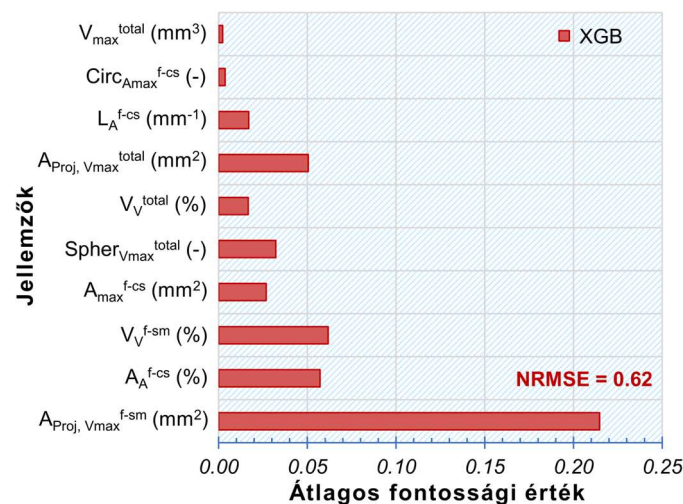
- b) A **szakítószilárdságra** ( $R_m = 238\text{--}267\text{ MPa}$ ) a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának az igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területe ( $A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}} = 0,04\text{--}0,85\text{ mm}^2$ ) jelentős hatással van, emellett a töretfelületi porozitásnak ( $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}} = 0,0\text{--}6,23\%$ ) kisebb a hatása (T3.b. ábra).



**T3.b. ábra:** A szakítószilárdság ( $R_m$  (MPa)) többváltozós regressziós modellezésével (nemlineáris alapmodellel: XGBoost (XGB)) kapott eredmények a független változók szerepét mutatják, ahol kiemelkedő az  $A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}} (\text{mm}^2)$  és az  $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}} (\%)$  hatása.

#### 4. Tézis

Ipari körülmények között alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356 öntvényekből kimunkált szakító próbatestek – 2D CT, illetve 3D CT módszerekkel jellemzett – pórusszerkezetének és a próbatestek **töretfelületi porozitásának** ( $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}} = 0,0\text{--}6,23\%$ ) kapcsolatát gépi tanulással támogatott, paraméter fontossági vizsgálattal (*Feature Importance*) végzett **többváltozós nemlineáris regressziós modellezés segítségével** (XGBoost algoritmusokkal) **elemelve** megállapítható, hogy: a töretfelületi porozitást a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának az igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területe ( $A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}} = 0,04\text{--}0,85\text{ mm}^2$ ), valamint a törési szegmens porozitása ( $V_V^{f\text{-sm}} = 0,01\text{--}0,50\%$ ), illetve a törési keresztmetszet porozitása ( $A_A^{f\text{-cs}} = 0,04\text{--}0,86\%$ ) **befolyásolja** (T4. ábra).



**T4. ábra:** A szakító próbatestek töretfelületi porozitásának ( $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}} (\%)$ ) többváltozós regressziós modellezésével (nemlineáris alapmodellel: XGBoost (XGB)) kapott eredmények a független változók szerepét mutatják, ahol kiemelkedő az  $A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}} (\text{mm}^2)$ , az  $A_A^{f\text{-cs}} (\%)$  és a  $V_V^{f\text{-sm}} (\%)$  hatása.

## 5. Tézis

Alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356 öntvények 2D CT, illetve 3D CT módszerekkel meghatározott pórusjellemzői közül **jelentős mértékben (összességében 75–75%-ban)** a teljes alakváltozó térfogat *első, második, illetve harmadik* legnagyobb térfogatú pórusainak ( $V_{max} (mm^3)$ ), valamint az *első, második, illetve harmadik*, az alakváltozás irányára merőleges síkban mérhető legnagyobb vetített területű pórusainak ( $A_{Proj, max} (mm^2)$ ) van **repedésképző szerepe** (T5. táblázat). Az így meghatározott két halmaz elemei részben azonosak.

**T5. táblázat:** A pórusjellemzők nagyságrendi sorában az *első, második, illetve harmadik* legnagyobb értékű jellemzőnél bekövetkezett tönkremenetel aránya a kijelölt törési szegmensben ( $f-sm$ ) és törési keresztmetszeten ( $f-cs$ ), ahol a 100%-ot a 24 (-) szakító próbatétel jelenti.

| (a) Pórusjellemzők                           |          | $V_v^{f-sm} (\%)$ | $S_v^{f-sm} (mm^{-1})$ |   |
|----------------------------------------------|----------|-------------------|------------------------|---|
| A 15 szegmens<br>három legnagyobb<br>értéke: | első     | 37,5              | 33,3                   | % |
|                                              | második  | 25,0              | 29,2                   |   |
|                                              | harmadik | 0,0               | 0,0                    |   |
| Összesen                                     |          | 62,5              | 62,5                   |   |

| (b) Pórusjellemzők                                                  |          | $V_{max}^{f-sm} (mm^3)$ | $Spher_{V_{max}}^{f-sm} (-)$ | $A_{Proj, V_{max}}^{f-sm} (mm^2)$ |   |
|---------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|
| A teljes alakváltozó<br>térfogatban a<br>három legnagyobb<br>érték: | első     | 41,7                    | 37,5                         | 58,3                              | % |
|                                                                     | második  | 16,7                    | 29,2                         | 12,5                              |   |
|                                                                     | harmadik | 16,7                    | 4,2                          | 4,2                               |   |
| Összesen                                                            |          | 75,1                    | 70,9                         | 75,0                              |   |

| (c) Pórusjellemzők                                     |          | $A_A^{f-cs} (\%)$ | $L_A^{f-cs} (mm^{-1})$ | $A_{max}^{f-cs} (mm^2)$ | $Circ_{A_{max}}^{f-cs} (-)$ |   |
|--------------------------------------------------------|----------|-------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|---|
| A 102<br>keresztmetszet<br>három legnagyobb<br>értéke: | első     | 29,2              | 29,2                   | 37,5                    | 8,3                         | % |
|                                                        | második  | 4,2               | 8,3                    | 16,7                    | 4,2                         |   |
|                                                        | harmadik | 16,7              | 8,3                    | 0,0                     | 8,3                         |   |
| Összesen                                               |          | 50,1              | 45,8                   | 54,2                    | 20,8                        |   |

## 6 A kutatási eredmények hasznosulása

A disszertációban ismertetett szerkezetvizsgálati módszerek elősegítik az alumínium öntvényekben előforduló pórusok szerkezetének részletes és objektív leírását. Az eredmények felhasználásával az adott célra leginkább alkalmazható vizsgálati eljárás(ok) kiválasztható(k).

A bemutatott többváltozós adat-vezérelt modellezés paraméter fontossági vizsgálattal együtt alkalmas a kétváltozós elemzéssel meghatározott összefüggések pontosítására, amivel egyszerre több független változó együttes hatása is vizsgálható.

A kutatási eredmények részletes képet adnak a pórusszerkezet hatásáról a törési folyamatokra és a mechanikai tulajdonságokra nézve, különösen alacsony nyomású öntéstechnológiával előállított, A356 ötvözetű alumínium öntvények esetén.

A CT-s vizsgálatok elősegítik az öntészeti minőségellenőrzést, ugyanis a pórusok általam meghatározott szerkezeti jellemzői révén ( $CSC$  (-),  $V_V^{total}$  (%),  $V_V^{sm}$  (%),  $A_{Proj, V_{max}^{sm}}$  ( $mm^2$ ),  $A_A^{cs}$  (%), illetve a  $V_{max}$  ( $mm^3$ ) és  $A_{Proj, max}$  ( $mm^2$ )) első három legnagyobb értéke a teljes térfogatban) – figyelembe véve a keresztmetszet vastagságát – meghatározhatóak a kritikus régiók. Ezáltal a kutatómunka hozzájárul az öntvények minősítési módszereinek fejlesztéséhez.

## 7 Summary

In this work, I determined by testing reduced pressure test specimens (RPT) with different pore structures, the applicability of 3D CT, 2D CT and OM structural investigation methods and which pore structures they can be used to test. I compared the porosity values obtained with their help and also investigated the effect of morphological image transformation (closing) and size reduction of the region of interest.

In the process, I found that while small pores and thinner pore channels can be measured well by **optical microscopy** due to the high resolution, inhomogeneously distributed pores and their spatial structure are difficult to measure and study. The latter should be evaluated by the **3D CT method** despite the fact that the resolution of the spatial image is less detailed than that of microscopic images. The **2D CT method** has the advantage that by collecting a large number of sectional images, the time required for pore distribution analysis is significantly less than for microscopic analysis, and the preparation of serial sections is much easier. During the 3D analyses, I recognized that the morphological transformation used is suitable for characterizing pore structures, while the porosity distribution can be described by varying the size of the volume under investigation (region of interest).

Based on the experiences, the **computed tomography structural analysis** method was found to be the most suitable method to investigate the pore structure of A356 alloy LPDC castings, the relationship of which with mechanical properties was investigated by bivariate analysis and **machine learning-assisted regression modeling**. In addition to this novelty, not just the spatial and fractured surface pore features (that have been extensively studied in the literature), but I have also investigated cross-sectional pore features and pore location (CSC). According to the results, I found that multiple regression modeling with Feature Importance testing is suitable for refining the relationships determined by bivariate analysis.

In line with the findings in the literature, I concluded that there is no direct relationship between **yield strength** (YS with 0.2% offset) and porosity, but that the findings on **ultimate tensile strength** (UTS) are just partially consistent with those. I found relationships between UTS and the projected area of the largest volume pore of the fracture segment and with the porosity of the fracture surface.

For the **total elongation at rupture**, I found that the cross-sectional location of the pores and the **porosity of the fracture surface** have a significant effect on it. The latter is influenced by the projected area of the largest volume pore of the fracture segment, the largest pore area ratio of the cross-sections of the fracture segment, and the volumetric porosity of the fracture segment.

I also established that pores with the largest volume and with the largest projected area of the largest pores of the fracture segments (measured in a plane perpendicular to the direction of deformation) have the **most crack-forming effect** in tensile tests.

## 8 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani **Dr. Gácsi Zoltán** témavezetőmnek, akire az évek során mindig számíthattam, folyamatosan mentorált, szakmailag támogatott és hitt bennem.

Szintén hálával tartozom

- **Dr. Fegyverneki Györgynek és Molnár Zsoltnak**, hiszen a kutatás végrehajtásához szükséges próbatesteket ők biztosították számomra, illetve
- **Dr. Mikóné Mádi Laurának**, aki pedig a kutatás kezdeti fázisában biztosított számomra mintákat a 3D-s CT vizsgálatok elsajátításához;
- **Boda Sándornak, Márkus Zoltánnak és Márkus Zoltánnénak**, akik a metallográfiai csiszolatok elkészítésében voltak segítségemre;
- **Filep Ádámnak és Dr. Bubonyi Tamásnak**, akiktől elsajátíthattam a CT berendezés működtetését és a 3D-s elemzések módszereit;
- **Dr. Mikó Tamásnak** a mechanikai anyagvizsgálatok elvégzésében való segítségéért;
- **Dr. Koncz-Horváth Dánielnek** a PFIB-SEM vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségéért;
- **Dr. Garami Attilának** a regressziós modellezésekért, akitől elsajátíthattam a gépi tanulás alapjait is. Közös folyóiratcikkünk kapcsán pedig külön köszönöm konstruktív szerepét.

S nem utolsó sorban köszönök mindennemű segítséget és támogatást az Anyag- és Vegyészmérnöki Kar Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében jelenleg, illetve az elmúlt években dolgozó valamennyi kollégának, akik bármilyen formában hozzájárultak a kutatómunkához és a disszertáció sikeres elkészítéséhez.

A kutatómunkát az évek során elnyert Új Nemzeti Kiválóság Programok (ÚNKP), illetve a 2024. évi Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Pályázat (EKÖP) is támogatta.

## 9 Nyilatkozat a mesterséges intelligencia (MI) használatáról

A dolgozat elkészítése során a nyelvhelyességi és stilisztikai javításokon kívül a mesterséges intelligencia szolgáltatásait a következő fejezetekben a következő eredmények elérése céljából vettem igénybe:

A **4.2.1 Prediktív regressziós modellek** c. fejezetben a gépi tanuló algoritmusok segítette prediktív adat-vezérelt regressziós modellezés a Python ML (Machine Learning) szoftver segítségével történt. A kapott adatokat saját magam dolgoztam fel és vontam le a tudományos következtetéseket. A modellezés működésének elvét a megfelelő szakirodalmi hivatkozásokkal együtt részletesen leírtam a disszertációban.

## 10 Saját publikációs jegyzék

### 10.1 A doktori értekezés eredményeihez kapcsolódó írásbeli publikációk

[F1] **Ágota Kazup**, György Fegyverneki, Zoltán Gácsi, Evaluation of the Applicability of Computer-Aided Porosity Testing Methods for Different Pore Structures, *Metallography, Microstructure, and Analysis* 11 (2022) 774–789. <https://doi.org/10.1007/s13632-022-00892-5>

Q2; Nyilvános idéző összesen: 8, Független: 5, Független: 3

[F2] **Kazup Ágota**, Koncz-Horváth Dániel, Gácsi Zoltán, Dendritközi porozitás töretfelületen történő kvantitatív vizsgálata, *Anyagvizsgálók Lapja* 2024/I. (2024) 10–14.

[F3] **Ágota Kazup**, Attila Garami, Zoltán Gácsi, Prediction of the tensile properties of A356 casted alloy based on the pore structure using machine learning, *Materials Science & Engineering A* 935 (2025) 148338. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148338>

Q1 (SJR Scopus - Condensed Matter Physics: D1)

### 10.2 A témában megjelent további publikációk

#### *Folyóiratcikkek:*

[F4] **Ágota Kazup**, Viktor Karpati, Balázs Hegedus, Zoltan Gacsi: Semi-continuous casting and microstructure investigation of the AlSi12 alloy, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 903 (2020) pp.

[F5] **Kazup Ágota**, Kárpáti Viktor, Hegedüs Balázs, Gergely Gréta, Gácsi Zoltán: Öntési paraméterek hatása a kristályosodó szövetszerkezetre félfolyamatosan öntött AlSi ötvözet esetén, *Bányászati és Kohászati Lapok*, 153. évfolyam, 2-3. szám (2020) pp. 27-31.

[F6] **Kazup Ágota**, Bubonyi Tamás, Mádi Laura és Gácsi Zoltán: Két- és háromdimenziós szerkezetvizsgálati eredmények összehasonlítása, *Anyagok Világa* 1 (2021) pp. 33-39.

[F7] **Kazup Ágota**, Bubonyi Tamás, Filep Ádám, Gácsi Zoltán: Komputertomográfia alkalmazása a gyakorlatban, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2021/IV. (2021) pp. 12-17.

[F8] **Kazup Ágota**, Bubonyi Tamás, Gácsi Zoltán: Számítógépes röntgen tomográfia (CT) in situ alkalmazása a mechanikai anyagvizsgálatban, *Doktorandusz Almanach*, 2022-1.kötet/1.vol. (2022) pp. 275-281. ISSN 2939-7294

[F9] **Kazup Ágota**, Gácsi Zoltán: AlSi7Mg0.3 ötvözet in situ szakítóvizsgálata számítógépes röntgen tomográfia (CT) segítségével, *Doktorandusz Almanach*, 2023-2. kötet/2.vol. (2023) pp. 7-13. ISSN 2939-7294

#### *Előadások:*

[E1] **Ágota Kazup**, Viktor Kárpáti, Balázs Hegedüs, Gréta Gergely, Zoltán Gácsi: Characterization of the Semi-Continuous Casted AlSi Alloy Microstructure in Function of Solidification Parameters, *20th International Metallurgy and Materials Congress*, 2021. 06. 10-12. In program book: pp.60., 21 slides.

- [E2] **Kazup Ágota**, Fegyverneki György, Gácsi Zoltán: Alumínium öntvények 3D szövetszerkezetének jellemzési lehetőségei, *XIII. Országos Anyagtudományi Konferencia*, Balatonkenese, **2021.** 10. 10-12.
- [E3] **Kazup Ágota**, Fegyverneki György, Gácsi Zoltán: Alumínium öntvények szövetszerkezet-vizsgálati módszereinek bemutatása, *MTA MAB Új eredmények az anyagtudományban*, MTA MAB székház, Miskolc, **2021.** 11. 08.
- [E4] **Kazup Ágota**, Fegyverneki György, Gácsi Zoltán: Alumínium öntvények pórusszerkezetének jellemzése különböző szerkezetvizsgálati módszerekkel, *Országos Röntgentomográfiás Fórum III.*, Veszprém, **2022.** 05. 20.
- [E5] **Kazup Ágota**, Fegyverneki György, Gácsi Zoltán: Alumínium öntvényben előforduló pórusszerkezetek jellemzése különböző szerkezetvizsgálati módszerekkel, *XXX. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás*, Balatonfüred, **2022.** 10. 05-07.
- [E6] **Kazup Ágota**, Molnár Zsolt, Fegyverneki György, Gácsi Zoltán: A pórusszerkezet és a mechanikai tulajdonságok közötti összefüggések feltárása alumínium öntvények esetén, *XXVI. Tavaszi Szél Konferencia*, Miskolc, **2023.** 05. 05-07.
- [E7] **Kazup Ágota**, Molnár Zsolt, Fegyverneki György, Gácsi Zoltán: Számítógépi tomográfia alkalmazása alumínium öntvények vizsgálatára, *IV. Országos Röntgentomográfiás Fórum*, Balatonalmádi, **2023.** 06. 29-30.
- [E8] **Kazup Ágota**, Gácsi Zoltán: Alumínium öntvények mechanikai és pórusszerkezeti jellemzőinek vizsgálata, *XIV. OATK*, Balatonalmádi, **2023.** 10. 08-10.
- [E9] **Kazup Ágota**, Garami Attila, Gácsi Zoltán: A térbeli pórusszerkezet hatása öntött AlSi7Mg0.3 ötvözet mechanikai tulajdonságaira, *II. AGY – Anyagvizsgálat a gyakorlatban Szakmai Konferencia és Kiállítás*, Győr, **2024.** 06. 05-07.
- [E10] **Kazup Ágota**, Garami Attila, Gácsi Zoltán: Öntött alumínium ötvözet pórusszerkezete és mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolat vizsgálata gépi tanulás (Machine Learning) segítségével, *V. Országos Röntgentomográfiás Fórum*, Veszprém, **2024.** 06. 27-28.
- [E11] **Kazup Ágota**, Garami Attila, Gácsi Zoltán: Öntött AlSi7Mg0.3 ötvözet pórusszerkezete és mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolat vizsgálata gépi tanulás segítségével, *XXXI. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás*, Balatonfüred, **2024.** 10. 9-11.
- [E12] **Kazup Ágota**, Garami Attila, Gácsi Zoltán: A CT szerepe a pórusszerkezet és a mechanikai tulajdonságok összefüggéseinek feltárásában, *VI. Országos Röntgentomográfiás Fórum*, Veszprém, **2025.** 06. 19-20.

## 11 Irodalomjegyzék

- [1] F. Bonollo, J. Urban, B. Bonatto, M. Botter, Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark (2005) Accessed: Oct. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.fracturae.com/index.php/aim/article/view/610>
- [2] M. Merlin, G. Timelli, F. Bonollo, G.L. Garagnani, Impact behaviour of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels, *J. Mater. Process. Technol.* 209(2) (2009) 1060–1073. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.027.
- [3] X. Teng, H. Mae, Y. Bai, T. Wierzbicki, Pore size and fracture ductility of aluminum low pressure die casting, *Eng. Fract. Mech.* 76 (8) (2009) 983–996. doi: 10.1016/j.engfracmech.2009.01.001.
- [4] S. Fintová, G. Anzelotti, R. Konečná, G. Nicoletto, Casting Pore Characterization by X-Ray Computed Tomography and Metallography, *Archive of Mechanical Eng.* 57(3) (2010) 263–273. doi: 10.2478/v10180-010-0014-y.
- [5] R. Liu *et al.*, Influence of pore characteristics and eutectic particles on the tensile properties of Al–Si–Mn–Mg high pressure die casting alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 783 (2020) 139280. doi: 10.1016/j.msea.2020.139280.
- [6] B.-C. Yang *et al.*, Effects of microstructure coarsening and casting pores on the tensile and fatigue properties of cast A356-T6 aluminum alloy: A comparative investigation, *Mater. Sci. Eng. A* 857 (2022) 144106. doi: 10.1016/j.msea.2022.144106.
- [7] S. Streck *et al.*, Influence of pores on the lifetime of die cast aluminium alloys studied by fracture mechanics and X-ray computed tomography, *Eng. Fract. Mech.* 284 (2023) 109243. doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109243.
- [8] **Á. Kazup**, G. Fegyverneki, Z. Gácsi, Evaluation of the Applicability of Computer-Aided Porosity Testing Methods for Different Pore Structures, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 11 (2022) 774–789. doi: 10.1007/s13632-022-00892-5.
- [9] Y. Zhang *et al.*, Porosity quantification for ductility prediction in high pressure die casting AM60 alloy using 3D X-ray tomography, *Mater. Sci. Eng. A* 772 (2020) 138781. doi: 10.1016/j.msea.2019.138781.
- [10] Z. Li *et al.*, Characterization on the formation of porosity and tensile properties prediction in die casting Mg alloys, *J. Magnes. Alloys* 10(7) (2022) 1857–1867. doi: 10.1016/j.jma.2020.12.006.
- [11] G. Dong *et al.*, Process optimization of A356 aluminum alloy wheel hub fabricated by low-pressure die casting with simulation and experimental coupling methods, *J. Mater. Res. Technol.* 24 (2023) 3118–3132. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.214.
- [12] **Á. Kazup**, A. Garami, Z. Gácsi, Prediction of the tensile properties of A356 casted alloy based on the pore structure using machine learning, *Mater. Sci. Eng. A* 935 (2025) 148338. doi: 10.1016/j.msea.2025.148338.
- [13] T. Fushiki, Estimation of prediction error by using K-fold cross-validation, *Stat. Comput.* 21(2) (2011) 137–146. doi: 10.1007/s11222-009-9153-8.
- [14] A. Kaveh, A. Dadras Eslamlou, S.M. Javadi, N. Geran Malek, Machine learning regression approaches for predicting the ultimate buckling load of variable-stiffness composite cylinders, *Acta Mech.* 232(3) (2021) 921–931. doi: 10.1007/s00707-020-02878-2.
- [15] A. Kopper, R. Karkare, R.C. Paffenroth, D. Apelian, Model Selection and Evaluation for Machine Learning: Deep Learning in Materials Processing, *Integr. Mater. Manuf. Innov.* 9(3) (2020) 287–300. doi: 10.1007/s40192-020-00185-1.
- [16] D. Cemernek *et al.*, Machine learning in continuous casting of steel: a state-of-the-art survey, *J. Intell. Manuf.* 33(6) (2022) 1561–1579. doi: 10.1007/s10845-021-01754-7.

- [17] B. Aksoy, M. Koru, Estimation of Casting Mold Interfacial Heat Transfer Coefficient in Pressure Die Casting Process by Artificial Intelligence Methods, *Arab. J. Sci. Eng.* 45(11) (2020) 8969–8980. doi: 10.1007/s13369-020-04648-7.
- [18] R. Rajput, A. Raut, S. Gangi Setti, Prediction of mechanical properties of aluminium metal matrix hybrid composites synthesized using Stir casting process by Machine learning, *Mater. Today Proc.* 59 (2022) 1735–1742. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.316.
- [19] S. Chen, T. Kaufmann, Development of Data-Driven Machine Learning Models for the Prediction of Casting Surface Defects, *Metals (Basel)* 12(1) (2021) 1. doi: 10.3390/met12010001.
- [20] M.-J. Kim *et al.*, Prediction of the Temperature of Liquid Aluminum and the Dissolved Hydrogen Content in Liquid Aluminum with a Machine Learning Approach, *Metals (Basel)* 10(3) (2020) 330. doi: 10.3390/met10030330.
- [21] A. Jakab-Nácsa *et al.*, Towards Machine Learning in Heterogeneous Catalysis—A Case Study of 2,4-Dinitrotoluene Hydrogenation, *Int. J. Mol. Sci.* 24(14) (2023) 11461. doi: 10.3390/ijms241411461.
- [22] H. Talbot, B. Appleton, Efficient complete and incomplete path openings and closings, *Image Vis. Comput.* 25(4) (2007) 416–425. doi: 10.1016/j.imavis.2006.07.021.
- [23] H. Hassanpour, N. Samadiani, S.M. Mahdi Salehi, Using morphological transforms to enhance the contrast of medical images, *The Egyptian J. Radiology and Nuclear Medicine* 46(2) (2015) 481–489. doi: 10.1016/j.ejrnm.2015.01.004.
- [24] F.L.E. Usseglio-Viretta *et al.*, Concavity-based local erosion and sphere-size-based local dilation applied to lithium-ion battery electrode microstructures for particle identification, *Comput. Mater. Sci.* 251 (2025) 113758. doi: 10.1016/j.commatsci.2025.113758.
- [25] W.E. Synder *et al.*, Closing gaps in edges and surfaces, *Image Vis. Comput.* 10(8) (1992) 523–531.
- [26] Z. Gácsi, P. Barkóczy, *Számítógépi képelemzés*. Miskolc: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [27] T. de Terris *et al.*, Optimization and comparison of porosity rate measurement methods of Selective Laser Melted metallic parts, *Addit. Manuf.* 28 (2019) 802–813. doi: 10.1016/j.addma.2019.05.035.
- [28] A. Nourian-Avval, A. Fatemi, Characterization and Analysis of Porosities in High Pressure Die Cast Aluminum by Using Metallography, X-Ray Radiography, and Micro-Computed Tomography, *Materials* 13(14) (2020) 3068. doi: 10.3390/ma13143068.
- [29] T. Yang *et al.*, Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: Influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties, *J. Alloys Compd.* 849 (2020) 156300. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156300.
- [30] J.C. Hastie *et al.*, Classifying shape of internal pores within AlSi10Mg alloy manufactured by laser powder bed fusion using 3D X-ray micro computed tomography: Influence of processing parameters and heat treatment, *Mater. Charact.* 163 (2020) 110225. doi: 10.1016/j.matchar.2020.110225.
- [31] Y. Chen *et al.*, Characterization of air-void systems in 3D printed cementitious materials using optical image scanning and X-ray computed tomography, *Mater. Charact.* 173 (2021) 110948. doi: 10.1016/j.matchar.2021.110948.
- [32] E. Lordan *et al.*, On the relationship between internal porosity and the tensile ductility of aluminium alloy die-castings, *Mater. Sci. Eng. A* 778 (2020) 139107. doi: 10.1016/j.msea.2020.139107.
- [33] G. Bozsonyi, AlSi7Mg0,3 öntvény szövetszerkezetének és mechanikai tulajdonságainak in situ komputertomográfias vizsgálata, MSc Diplomamunka, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2024.
- [34] **Á. Kazup**, D. Koncz-Horváth, Z. Gácsi, Dendritközi porozitás töretfelületen történő kvantitatív vizsgálata, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2024(1) (2024) 10–14.

- [35] M. H. Mosallanejad *et al.*, A novel feature engineering approach for predicting melt pool depth during LPBF by machine learning models, *Addit. Manufact. Letters* 10 (2024) 100214. doi: 10.1016/j.addlet.2024.100214.