

- [8] S. Viswanathan, D. Apelian, R. J. Donahue et al.: Organic Binder, in: ASM Handbook, Volume 15: Casting, pp. 529–543, Materials Park, Ohio, USA, 2008
- [9] H. W. Dieter: „Core knock-out”, in Foundry Core Practice, 2nd ed., Chicago, IL: American Foundrymen’s Society, pp. 473–478., 1950
- [10] M. J. Keil, J. Rodriguez, S. N. Ramrattan: Thermal Distortion of Shell Sand No-bake Binder Systems. AFS Transaction, vol. 107, pp. 71–74, 1999
- [11] Dr. Tóth Levente, Détári Anikó: Maghomokkeverékek deformációs tulajdonságainak vizsgálata. Mechatronika, Anyagtudomány, Vol. 1, No. 3, pp. 101–110, ISSN 1589–827X, Miskolc, 2007
- [12] Budavári Imre, Dargai Viktória, Dr. Varga László: Víz-üveges maghomokkeverékek melegdeformációs tulajdonságainak vizsgálata Hot-Distortion készülékkel, BKL Kohászati Lapok, 150. évf., 5. sz., pp. 15–19, 2017
- [13] Budavári Imre, Dr. Varga László: A sütési idő és sütési hőmérséklet hatása a héjhomok melegdeformációs tulajdonságaira, XXI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Nagybánya, 2019.
- [14] U. Recknagel, W. Tilch: Untersuchungen zum Ausdehnungsverhalten von Formstoffen im Hinblick auf die Vermeidung typischer Gußfehler – Teil 1. Gießerei-Praxis, 9/2000, S. 378–384.

SZALVA PÉTER – ORBULOV IMRE NORBERT

# A vákuumos kilevegőzés hatása a nyomásos öntéssel gyártott alumíniumöntvények kifáradási tulajdonságaira

**A nyomásos öntvények porozitása közvetlen hatással van az előállított darabok mechanikai és kifáradási tulajdonságaira. A tanulmányban vákuumos kilevegőzés nélkül és annak alkalmazásával előállított alumínium próbatestek kifáradását vizsgáltuk  $R = -1$  és  $R = 0,1$  terhelésszimmetria-tényezővel az élettartam-szilárdság tartományban. Az öntény próbatesteket előzetesen roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárással, számítógépes tomográfia alkalmazásával vizsgáltuk. A kifáradást követően a töretfelületen megvizsgáltuk a repedés kiindulás helyét, és azonosítottuk azt az előzetes vizsgálati eredményekben. Végezetül összefüggéseket kerestünk a vizsgálati eredmények között.**

## 1. Bevezetés

A nyomásos alumínium öntvények autóiipari felhasználásában beépítési környezettől függően, a kifáradással szembeni ellenállás követelménye terjed. A termékek rendeltetésszerű felhasználása során az ismétlődő igénybevételekkel szembeni ellenállás komoly kritérium. Ez a követelmény pedig szériáról szériára szigorodik [1]. Ez az adott terhelési szinten megkövetelt kifáradási ciklusszám vagy a megbízhatósági szint növekedésében mutatkozik meg. Ebből is adódik, hogy megbízható nyomásos öntvény tervezése megköveteli a kifáradási határ és az élettartam–szilárdság tervezhetőségét [2]. A tanulmányunkban vizsgált alapanyag az AlSi9Cu3(Fe) ára és mechanikai tulajdonságai miatt ismert, és széles körben alkalmazott öntészeti alumínium. Az alapanyag Wöhler-diagramja szintén ismert [3], azonban a diagram könyökpontja, a görbék meredeksége és a megbízhatóság értékei függenek az öntéstechnológia feltételeitől [4]. Ezen technológiák egyike a vízszintes

hidegkamrás nyomásos öntés, valamint eljárásváltozatai. A nyomásos öntéssel előállított termékek nagy geometriai összetettséggel, pontos mérettel, jó felületi minőséggel rendelkeznek [5]. A technológia által szavatolt előnyök mellett a gyártás rövid ciklusideje szolgáltatja a nagyszériás gyártás kiváló gazdaságosságát. Az előbb felsorolt előnyök az autóiipari felhasználásnak kedveznek. Többek között az autóiipari igények tették szükségessé a technológia eljárás-változatainak fejlődését, ezek közül is kiemelve a vákuumos kilevegőzést. A termékek utólagos feldolgozhatósága (mint oldóhőkezelés, hegesztés, bevonatolás, ragasztás stb.) a vákuumos kilevegőzés nélkül egyáltalán nem, vagy csak gazdaságtalanul valósítható meg [6]. Azonban megjegyzendő, hogy nem csak a vákuumos kilevegőzés teszi ezeket lehetővé.

A probléma hátterében az eljárás közben alkalmazott nagy sebességű olvadt fém szerszámba áramlása közben bekeveredett és bezáródott gázok vannak [7]. Ezért is kijelenthető, hogy a szerszámgeometria közvetlen hatással

**Szalva Péter** 2006-ban diplomázott a BME Gépészmérnöki Karán, 2008-ban szerezte meg a hegesztő szakmérnöki diplomát. 2015-től dolgozik a Fémalk Zrt.-nél, ahol fő feladata a vákuumos kilevegőzéssel támogatott vízszintes hidegkamrás nyomásos öntés és alkalmazási területeinek technológiai fejlesztése. Ipari kutatóként az öntvények inhomogenitásainak a darab élettartamára gyakorolt hatását vizsgálja.

**Dr. Orbulov Imre Norbert** 2009-ben szerzett PhD-fokozatot a BME Gépészmérnöki Karán, majd 2018-ban szerezte meg az MTA doktora címet. Jelenleg az Anyagtudomány és Technológia Tanszék egyetemi tanára és az MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport vezetője. Kutatási területe a fémmátrixú kompozitok és fémhabok előállítása öntészeti eljárásokkal, valamint a kompozitok tulajdonságainak vizsgálata.

van a darab minőségére [8]. A darabokat terhelik a természetes öntési hibák, amelyek a technológia szükségszerű velejárói. Ezen természetes hibák jellemzően a zsugorodások (térfogati és szivacsos zsugor), gázporozítások, zárványok és az oxidzárványok [9]. A felsorolt öntvényhibák nagymértékben befolyásolják a termék mechanikai és kifaradási tulajdonságait [10]. A napjainkban alkalmazott ipari olvadékezelési eljárások jelentősen csökkentik a zárványok okozta hibák előfordulását, és kedvezően hatnak a nagyméretű oxidhártvány eltávolítására. A tanulmányunkban elsősorban a zsugor és gáz okozta hibákra fókuszáltunk. A kifaradásra gyakorolt hatás jellemezhető az anyagfolytonossági hiba méretével, alakjával, morfológiájával (térfogati, szivacsos stb. jellegű) és elhelyezkedésével [11].

A vákuumos kilevegőzés megvalósítását az öntőgép öntési műveletének fázisaihoz igazítva mutatjuk be. Először a kamrába juttatott olvadékot kis sebességgel, 0,2-0,5 m/s-mal feltölti a dugattyú, és eljuttatja a formaüreg határáig. Ezt követi a nagy sebességű formatöltés 2-5 m/s-os dugattyúsebességgel. Az utolsó lépésben a formaüregbe juttatott fémre a dugattyú nagy utánnomást fejt ki [12]. A vákuumos kilevegőzést az öntőszerszámba épített vákuumszelepen keresztül egy külső vákuumegységgel valósítják meg. Az elszívás az első fázisban vezérléssel kapcsol be, majd végig fennáll a töltés közben. Az elszívószelepet a dermedő fém zárja le, mellyel a levegő jelentős része eltávozik a formaüregből [13].

A próbatesteket a fázisvizsgálatot megelőzően számítógépes tomográfiával (computed tomography – CT) vizsgáltuk. A CT egy roncsolásmentes vizsgálat [14], előnye az inhomogenitások precíz, háromdimenziós detektálása [15]. Az eljárás számos paramétere közvetlen hatással van az eredmények minőségére, ezért képzett és gyakorlott gépkezelőt (operátort) követel meg a vizsgálat. A vizsgálat végeredménye egy háromdimenziós kép, aminek a minőségét a jól megválasztott paraméterek mellett a vizsgált darab geometriája is befolyásolja [16]. Fontos tényező továbbá a CT-vizsgálat gazdasági vonzata, amit a rendkívül költséges berendezés is befolyásol. Habár az eljárás lehetőséget teremt részletes hibadetektálásra, az a hagyományos kiértékelési eljárások mellett indokolatlanul nagy selejtet eredményezhet [17]. A CT-vizsgálat lehetőséget teremt a detektált porozítások és a fáradásos repedések kiindulása közötti kapcsolat megteremtésére [18]. Ezért egy jól definiált kiértékelési követelményrendszerrel kell összeállítani egy adott öntvényhez, hogy limitálja az eljárás darabra vonatkoztatott költségvonzatát.

Ebben a tanulmányban vákuumos kilevegőzés nélkül és vákuumos kilevegőzéssel gyártott AISi9Cu3(Fe) alumínium próbatesteket fázisvizsgáltunk  $R = -1$  és  $R = 0,1$  terhelésszimmetria-tényezővel az élettartam-tartományban. A darabokat előzetesen roncsolásmentes anyagvizsgálattal, CT-vel vizs-

gáltuk. A kifaradást követően a töreffület repedés kiindulási helyét optikai mikroszkóppal vizsgáltuk, és visszamenőlegesen azonosítottuk azokat a CT-eredményekben. Összegezve, a tanulmányban vizsgált darabok és a vizsgálati eljárások keretein belül kapcsolatot teremtettünk a CT vizsgálati eredmények és fáradásos tönkremenetek között.

## 2. Felhasznált anyagok és módszerek

### 2.1. A vizsgált ötvözet

A próbatesteket az AISi9Cu3(Fe) (DIN 226) nyomásos öntészeti alumíniumötvözetből gyártottuk. Az olvasztott alapanyag kémiai összetételét az 1. táblázat mutatja. Az anyagválasztás oka a széleskörű ipari alkalmazás szerkezeti elemek esetén, valamint az ötvözet kedvező ára. Az ötvözet kedvező mechanikai tulajdonságokkal és kifaradással szembeni ellenállással rendelkezik. A jó kifaradással szembeni viselkedés az alapanyag nagy (~ 9 t%) szilíciumtartalma ellenére az öntés során keletkező finomszemcsés kéregnek, valamint a szintén szilárdságnövelő (~ 3 t%) réz-ötvözésnek is köszönhető.

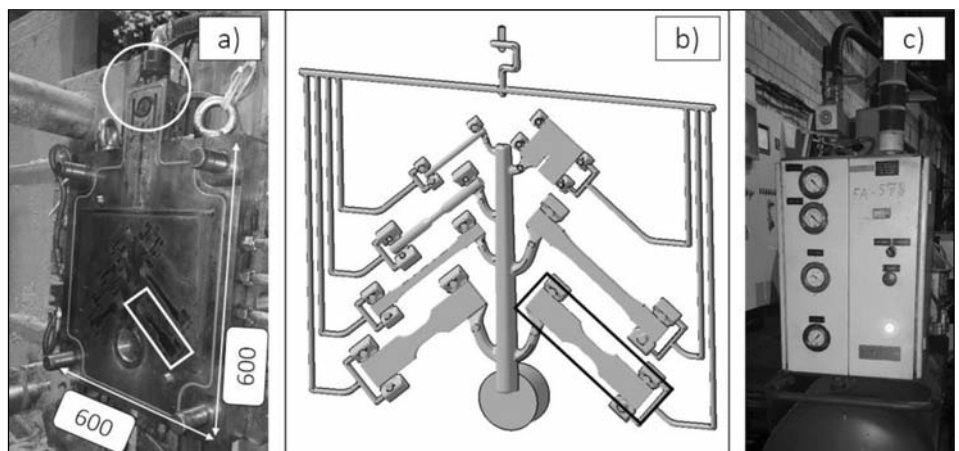
1. táblázat. Az alapanyag kémiai összetétele [19] röntgen fluoreszcencia spektrometriás méréssel

Ötvözet	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
	t%							
DIN226	9,17	0,72	2,85	0,27	0,27	0,60	0,08	Maradék

Az alapanyagot Marconi-típusú földgáztüzelésű kemencében olvasztottuk. Az olvadékezelést Rotaxal-típusú rotoros gáztalanítóban végeztük, nitrogéngázos öblítéssel 6 percig, Elimoxal NF52 tisztítóso-adagolással. Az öntés során az olvadékot automata adagolású Striko Westofen ellenállás fűtésű hőtartó kemencéből juttattuk az öntőgép (OMS 450) töltőkamrájába. A teszt során az olvadék hőmérsékletét 700 °C-on tartottuk.

### 2.2. A nyomásos öntőgép, az öntési paraméterek és a próbatest szerszám

A próbaöntést OMS 450-es típusú vízszintes hidegkamrás nyomásos öntőgépen hajtottuk végre. A bevezetőben is-



1. ábra. a) az öntőszerszám álló része; b) az öntvénycsokor modellje; c) a vákuumtámogató-egység

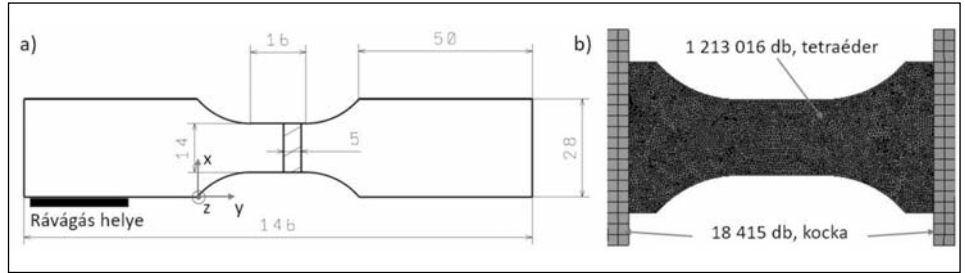
mertett folyamat alapján a vákuumszűrő indító jelét az öntődugattyú útjele adta. A vákuumszelep közvetlenül a szerszám kilevegőzési rendszeréhez (1a ábra) csatlakoztatott VDS kinetikus szelep volt, amelyet az ábrán körrel jelöltünk. A próbatest csokormodelljét az 1b ábra mutatja, a választott fásasztó próbatestet négyszöggel jelöltük. A vákuumot egy külső berendezés szolgáltatta (1c ábra). A vákuum abszolút nyomásértékét Thyracont VD81 digitális nyomásmérő műszerrel mértük.

A fészkek teljes rávágási keresztmetszete 136 mm<sup>2</sup>, a közösített kilevegőzési rendszer keresztmetszete a vákuum szelep előtt 33 mm<sup>2</sup>. A vákuumos kilevegőzéssel gyártott darabok esetében 110 ± 10 mbar abszolút nyomásértéket mértünk. Eljárásváltozatónként 40 csokrot gyártottunk széria jelleggel, amiből az első 3 lövést technológiai okok miatt eldobtuk. A szerszámfeleket Tool-Temp 288-as típusú olajos hőszabályozó egységekkel 170 °C-os hőmérsékletre állítottuk be. Az öntvénycsokor bruttó térfogata (rávágási és kilevegőzési rendszerrel együtt) 289,3 cm<sup>3</sup> volt, a kamrába zárt levegő térfogata 517 cm<sup>3</sup>, amit 40%-os töltöttségi fokkal számoltunk (60 mm-es dugattyú átmérő). Az öntési paraméterek a vákuumos kilevegőzésű próbák során az első fázisban 0,19 m/s, a második fázisban 2,9 m/s, a harmadik fázisban a nyomás értéke 320 bar volt. Az öntvénycsokrokat robotos mozgatással távolítottuk el a szerszámból, és áramoltatott vízű medencében hűtöttük. A fásasztóvizsgálat előtt legalább 8 napot pihentek a darabok.

### 2.3. A próbatest végelelemes vizsgálata

A vizsgálatban alkalmazott öntvények szabványos kialakítású ASTM E466-15 [20], 5 mm vastag, 14 mm széles lapos fásasztó próbatestek. A próbatestet természetesen öregedett állapotban fásasztottuk az egytengelyű fásasztó vizsgálat során. A próbatestet stancolón választottuk le az öntvénycsokorról, a vizsgálati szakasz stancolási maradványát csiszolópapírral távolítottuk el. A behúzott nyak szakaszban a felületi érdesség átlagos értéke  $R_a = 0,75 \pm 0,3 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 5,6 \pm 0,2 \mu\text{m}$ . A próbatest méreteit és nevezetes pontjait a 2a ábra mutatja.

Az adott terhelési szinten a próbatestben ébredő feszültségeloszlást végelelemes környezetben modelleztük Ansys szoftverrel. A hálózás során másodrendű elemeket használtunk, a próbatestet tetraéderekkel, a befogót kocka elemekkel modelleztük, amit a 2b ábra mutat. A próbatestet 0,5 mm-es átlagos elemmérettel (1 213 016 elem), a befogót 2 mm-es átlagos elemmérettel (18 415 elem) hálóztuk. Az átlagos elemméret-választás előzetes érzékenységvizsgálaton alapult. A próbatest és a befogó között alkalmazott kapcsolat neve a szoftverben „bonded”, ami merev kapcsolatot jelent. A próbatest anyaggörbéje bilineáris volt; a mért és a szabványos [21] paraméterek alapján a rugalmassági modulus  $E = 73 \text{ GPa}$ , Poisson-tényező  $\nu = 0,33$ , az egyezményes folyáshatár  $R_{p0,2} = 185$



2. ábra. a) a próbatest geometriája és jelölései; b) a végelelemes modell hálója

MPa és a tangens modulus  $Tan = 4850 \text{ MPa}$ , ami a feszültség–alakváltozás görbe második egyenesének a meredeksége. A végelelemes számításokat minden terhelési szint maximális húzóterhelésével számoltuk mindkét feszültség-aszimmetria-értékre.

### 2.4. Roncsolásmentes anyagvizsgálat CT-vel

Az öntvények előzetes roncsolásmentes anyagvizsgálatát számítógépes tomográfiával (CT) végeztük [22]. A vizsgálatot egy GE Phoenix v|tome|x c CT-berendezéssel végeztük. A röntgensugárcső fő vizsgálati paraméterei: gyorsító feszültség 240 kV, gerjesztő áram 160  $\mu\text{A}$ . A röntgenszkennelés felbontása a legkisebb térfogatú rekonstruált háromdimenziós elem alapján 25  $\mu\text{m}$  élhosszúságú kocka volt, ezt az értéket az angol terminológia voxel méretnek hívja. A CT-vizsgálat rekonstrukciója a GE algoritmusai alapján történt, a porozitás kiértékelést a Volume Graphic Studio Max 3.2 verziójú szoftverrel végeztük [23]. A technológiaváltozatokkal gyártott kétszer 40 darab próbatestből véletlenszerűen választva kétszer 20 darabot vizsgáltunk CT-vel, tekintettel a vizsgálat idő- és költségvonzatára. A próbatesteket a két terhelésaszimmetria 4-4 terhelési szintjére úgy osztottuk, hogy 2-2 próbatestet vizsgáltunk a nagyobb, és 3-3 próbatestet a kisebb terhelési szinteken. A légköri nyomáson gyártott próbatestek „A” jelölést kaptak, a vákuumos kilevegőzéssel gyártott próbatestek „V” jelölést.

Az elvégzett CT-vizsgálatok pontos és kvantitatív (statistikai elemzés alapján) betekintést adtak az anyag inhomogenitásaiba. Egy CT-vizsgálat több kiértékelési eljárás-hoz képes adatot szolgáltatni, jelen tanulmányban a kiértékelést a VDG P202-es [24] szabvány alapján végeztük el. A kiértékelésben vizsgált paraméterek: a) detektált hibaátmérő; b) hibaközéppont elhelyezkedése az x, y, z koordináta-rendszerben (2a ábra); c) detektált hiba mérete voxelben; d) detektált hiba térfogata és felülete. Az előző adatokból összefüggéssel (1) számolható a hiba gömbölyűsége [25], ami az adott hibát jellemző érték a térfogat és felület alapján:

$$\Psi = \frac{\pi^{\frac{1}{3}}(6V_p)^{\frac{2}{3}}}{S_p} \quad (1)$$

ahol,  $\Psi$  jelenti az adott porozitás gömbölyűségét, ami  $V_p$  (mm<sup>3</sup>) térfogatú és  $S_p$  (mm<sup>2</sup>) felületű.

A hibaalak további jellemzésére elfogadott összefüggés az alaktényező [25], amely a következő alakban írható (2):

$$S = \frac{r S_p}{3 V_p} \quad (2)$$

ahol  $S$  jelenti az adott hiba alaktényezőjét, ami  $r$  rádiuszú (mm),  $V_p$  (mm<sup>3</sup>) térfogatú és  $S_p$  (mm<sup>2</sup>) felületű. Az alkalmazott két paraméter számszerű leírást ad az adott porozitás alakjáról. Egy adott öntvény CT-eredményét szinte lehetetlen ellenőrizni sorról sorra, azonban a hiba térfogata, a gömbölyűség és az alaktényező egyértelműen leírja az inhomogenitásokat. A kiértékelésben részletesen visszatérünk ezek értelmezésére a vizsgálatokból vett példákkal.

### 2.5. Fárasztóvizsgálat és töretelezés

Az egytengelyű fárasztóvizsgálatokat egy Instron 8800 szervo-hidraulikus fárasztóberendezésen végeztük. A berendezés maximális terhelhetősége  $\pm 25$  kN. A fárasztóvizsgálat erő vezérléssel történt, szinuszos terheléssel, 20 Hz-en, szobahőmérsékleten. A vizsgálat befejezésének a kritériumai a következők voltak: ha az elmozdulás nagyobb mint 0,2 mm, vagy ha nincs törés  $2 \cdot 10^6$  ciklust követően [26]. A kifáradási ciklusszámválasztás oka a vizsgálat eredményének célzott ipari alkalmazása. A terhelésszintek az adott feszültségaszimmetria-tényezők mellett a következők:  $R = -1$  ( $\sigma_{amp} = 125; 135; 150; 180$  MPa), és  $R = 0,1$  ( $\sigma_{amp} = 72; 82; 90; 105$  MPa). Az adott terhelési szinten kapott kifáradási ciklusszámokat a kétparaméteres Weibull-eljárással értékeltük ki [27]. Az élettartamszakaszban a kapott eredményeket a Basquin-törvény (3) alapján, azonos megbízhatósági szinten, a legkisebb négyzetek módszerével illesztettük.

$$\sigma_f' = CN^b \quad (3)$$

Ahol  $\sigma_f'$  az adott ciklusszámhoz tartozó feszültségérték (MPa) 50% megbízhatóságon,  $C$  empirikus állandó (MPa) az az érték, ahol a nagyciklusú tartományban érvényes görbemeredekséggel a függőleges tengelyt elmetszenénk,  $N$  az adott ciklusszám,  $b$  pedig a görbe meredeksége. A vizsgálat során kifáradt próbatetek töretfelületét Olympus SZX16 típusú sztereo fénymikroszkóppal vizs-

gáltuk, hogy feltárjuk és azonosítsuk a repedés kiindulási helyét.

## 3. Eredmények és elemzésük

### 3.1. Fárasztóvizsgálat

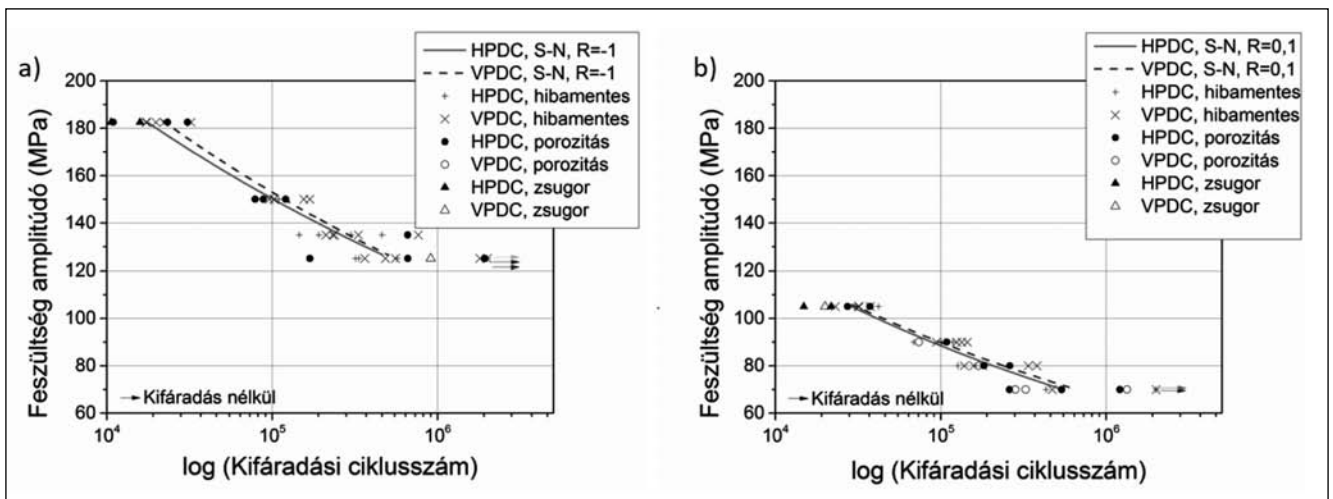
A kifáradási határt a Basquin-törvény alapján határoztuk meg, 50%-os megbízhatóságon, az összefüggést a legkisebb négyzetek módszerével illetve (3. ábra). A megjelölt görbék egyenként 20 próbatest alapján számoltuk, valamint osztályoztuk a tönkremenetelt hibamód alapján. A vákuumos kilevegőzés nélküli darabokat HPDC (high pressure die cast) rövidítés, a vákuumos kilevegőzéssel gyártott darabokat VPDC (vacuum-assisted pressure die cast) rövidítés jelöli. A görbékhez tartozó egyenletek paramétereit a Basquin-összefüggés (3) alapján a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. Az élettartamszakasz-görbék paramétereit a Basquin-törvény (3) alapján

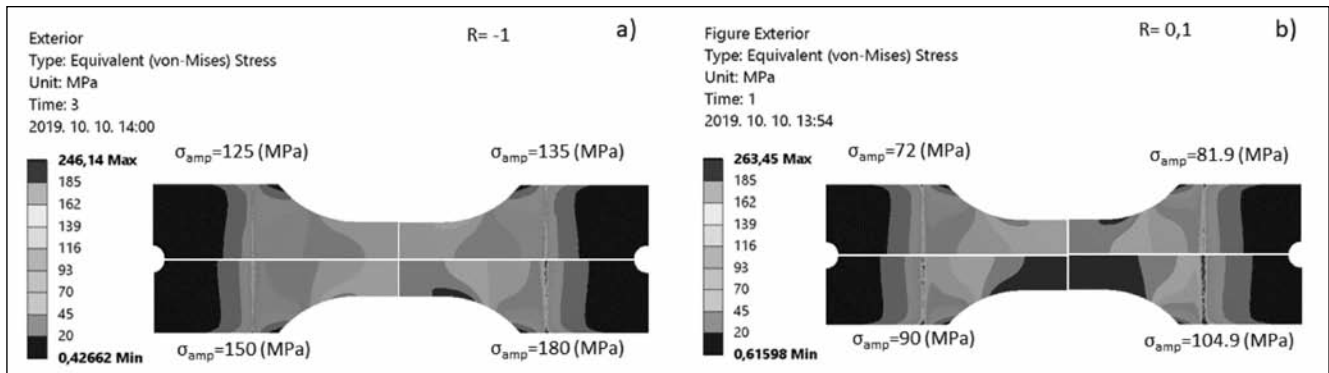
Megbízhatóság 50%	R = -1		R = 0,1	
	b	C MPa	b	C MPa
Vákuum nélkül	-0,112	544,8	-0,138	432,1
Vákuumos kilevegőzés	-0,118	593,2	-0,132	412,5

A vákuumos kilevegőzés nélkül gyártott próbatetek a tönkremenetel hibamódja alapján nagy változatosságot mutattak: 2 próbatest túlélt, 1 próbatest a befogásánál tört el (kiértékelésből kivett), 3 zsugorodás miatt, 18 porozitás miatt ment tönkre, és csak 16 próbatest fáradt ki a klasszikus, felületről (nem pedig egy belső hibából) kiinduló módon. A vákuumos kilevegőzéssel gyártott próbatetek tönkremenetel alapján jellemzően a klasszikus, felületről kiinduló kifáradást mutattak 32 próbatest esetén, 3 tönkremenetele zsugorodásra, 2 porozításra vezethető vissza és 3 próbatest túlélt.

A statisztikai kiértékelés alapján az adott terhelési szinten a kifáradási ciklusszám minden esetben kisebb volt az öntési hibákkal terhelt darabok esetében összehasonlítva a nem belső hibából (hanem a felületről) kiinduló, klasszikus úton kifáradt darabokkal szemben. Egy adott terhelési szinten



3. ábra. A vákuumos kilevegőzés nélküli és vákuumos kilevegőzéssel gyártott próbatetek S-N görbéje, és a tönkremenetel okai: a)  $R = -1$ ; b)  $R = 0,1$



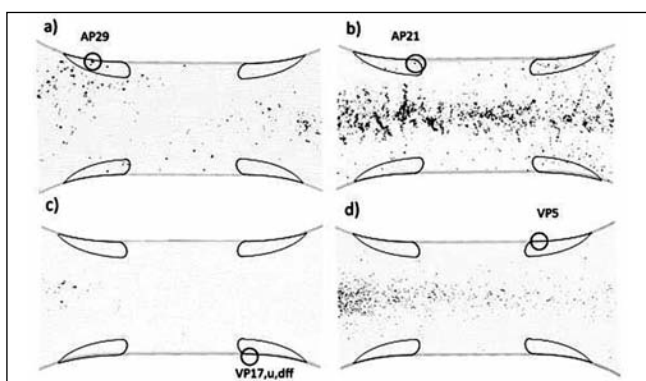
■ 4. ábra. A próbatetek feszültségképe az egyes terhelési szinteken: a)  $R = -1$ ; b)  $R = 0,1$

ten az öntési hibákból származó tönkremenetel nagyobb szórást mutat a klasszikus úton kifáradt darabokkal összehasonlítva. Továbbá, a vákuumos kilevegőzés nem változtatja meg görbe a meredekségét, de a nagyobb átlagérték jobbra tolja azt, és csökkenti a szórást.

### 3.2. Roncsolásmentes anyagvizsgálat

A CT vizsgálati eredmények és a töretfelületek párosítása több fontos összefüggést feltárt. A vártak megfelelően, a klasszikus módon kifáradt darabok repedésének kiindulása a felületről véletlenszerűen indult meg. Azonban az öntési hibából kiinduló és tönkremenetel-okozó repedések a vizsgált darabok jelentős esetében egy konkrét területen koncentráálódtak. Ez a terület a darab egyenes szakasza a kiszélesedő nyak előtt. A jelenség magyarázatát a próbatest végeeselemes vizsgálata adta. A feszültségmező alakja és az egyenértékű von Mises-féle feszültség értéke alapján az adott terhelési szintek maximális terhelésénél, a darabok ezen területe feszültségkoncentrációs hely. Vagyis az adott terület hibája feszültségkoncentrátorként viselkedett. A darabok szimmetriatulajdonsága miatt az egyes aszimmetria tényezők 4-4 terhelési szintjét a 4. ábra mutatja.

A CT-vizsgálatok háromdimenziós képeit a lapos próbatest síkjába forgatva jelenítettük meg, amit az 5. ábra mutat. A nagymennyiségű képi adat miatt négy jellegzetes darabot emeltünk ki. A képfeliratok az adott próbatestek sorszámait, a tönkremenetel helyét karika, a legterheltebb zónát folyamatos vonal jelöli. A vákuumos kilevegőzés nél-



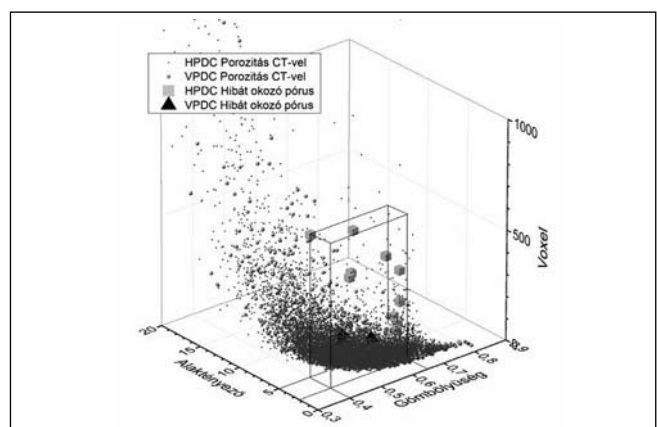
■ 5. ábra. Próbatestek vizuális CT-eredménye. Vákuumos kilevegőzés nélkül a) legkisebb porozitás 0,46%; b) legnagyobb porozitás 5,41%. Vákuumos kilevegőzéssel c) legkisebb porozitás 0,08%; d) legnagyobb porozitás 1,19%

kül gyártott darabok legkisebb porozitású darabja (AP29) 0,46%, a legnagyobb porozitású darabja (AP21) 5,41%, ebben az adatsorban az átlagérték 2,36% volt.

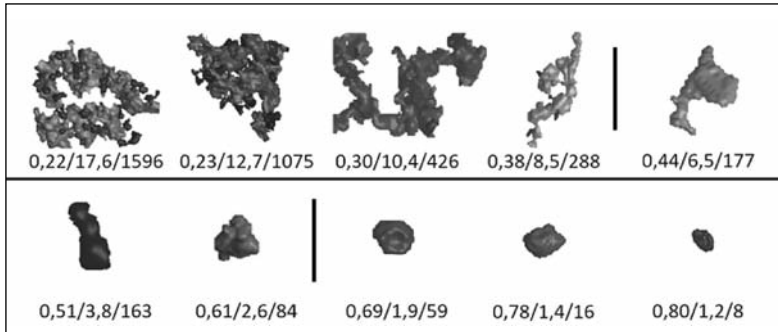
A vákuumos kilevegőzéssel gyártott darabok legkisebb porozitású darabja (VP29) 0,08%, a legnagyobb porozitású darabja (VP5) 1,19%, ebben az adatsorban az átlagérték 0,45% volt. A porozitás értékeket a vizsgálati szakasz teljes térfogati, CT-vel detektált értéke alapján határoztuk meg. Az átlagértékek is jól mutatják (a vákuumos kilevegőzéssel 0,45%, a vákuumos kilevegőzés nélkül 2,36%), hogy a vákuumtámogatás jelentősen csökkenti az öntvény porozitását, a vizsgálatban ismertetett szerszámgeometriánál. A jelentős porozitáscsökkenés összességében azt eredményezte, hogy a vákuumos kilevegőzéssel gyártott próbatetek jellemző tönkremeneteli módja a klasszikus, felületről kiinduló kifáradás.

### 3.3. A tönkremenetelt okozó hibák vizsgálata

Az inhomogenitások vizsgálata az egész darabra kiterjedt, nem csak a töretfelületre. Az adatpárosítás során, amennyiben az adott darab nem a klasszikus módon fáradt ki, dokumentáltuk a tönkremenetelt okozó hibák gömbölyűségét, alaktényezőjét és a térfogatát. A darabok CT-eredményeinek numerikus vizsgálata manuálisan feldolgozhatatlan mennyiségű adatot foglal magában. Azonban az ismertetett szempontok alapján kiértékelte inhomogenitások adatai a vizuális eredményekkel kiegészítve azt mutatta, hogy a törést okozó hibák egy szűkebb tartományba estek. Az öntési variánsokként szkennelt  $2 \times 20$  fásasztó próbatest



■ 6. ábra. Az inhomogenitások megjelenítése a jelölt paraméterek alapján



■ 7. ábra. A detektált inhomogenitások alakja és az azokat leíró paraméterek

minden inhomogenitását megjelenítettük, gömbölyűség, alak tényező és a hibaméret szerint (6. ábra). Megjelenítettük azokat a hibákat is, amelyek a kifáradásos repedés kiindulásai voltak. A hagyományos kilevegőzéssel gyártott (HPDC) darabok esetén 14, a vákuumos kilevegőzéssel gyártott darabok közül 3 jelölés került az ábrára.

A kifáradást okozó porozitások a következő tartományokba estek (a felsorolás első értékpárja a vákuumos kilevegőzés nélküli daraboké, a perjel utáni adatpárak a vákuumos kilevegőzéssel gyártottak): gömbölyűség 0,40–0,62/0,47–0,54, alak tényező 2,1–5,0/2,9–4,2, hibaméret voxelben 54–649/140–177. Az adatpárokból látható, hogy a vákuumos kilevegőzés szűkítette a detektált hibák paramétertartományát.

Az előző ábrából látható, hogy a szűkebb tartomány ellenére az inhomogenitások alakja, mérete nagy változottságot mutat. Az alkalmazott összefüggések alapján megjelenített hibák egy spirálszerű tölcserű alkotnak. Ez a forma egy harmadrendű görbével jól közelíthető, de a méretnövekedéssel növekvő szórás miatt már nem lenne szemléletes. Ezért a tölcser alak mentén, a három adatot figyelembe véve egy mintasort állítottunk össze (7. ábra), a ténylegesen detektált inhomogenitások képe alapján, valamint jelöltük a tönkremenetelt okozó hibatarományt. Látható, hogy a tönkremenetelt okozó tartomány fölött jellemzően zsugorporozítás, a jelölt tartomány alatt apró, gázporozitásszerű hibák vannak. A jelenség lehetséges magyarázata összetett, kérdés, hogy a jelölt tartományon

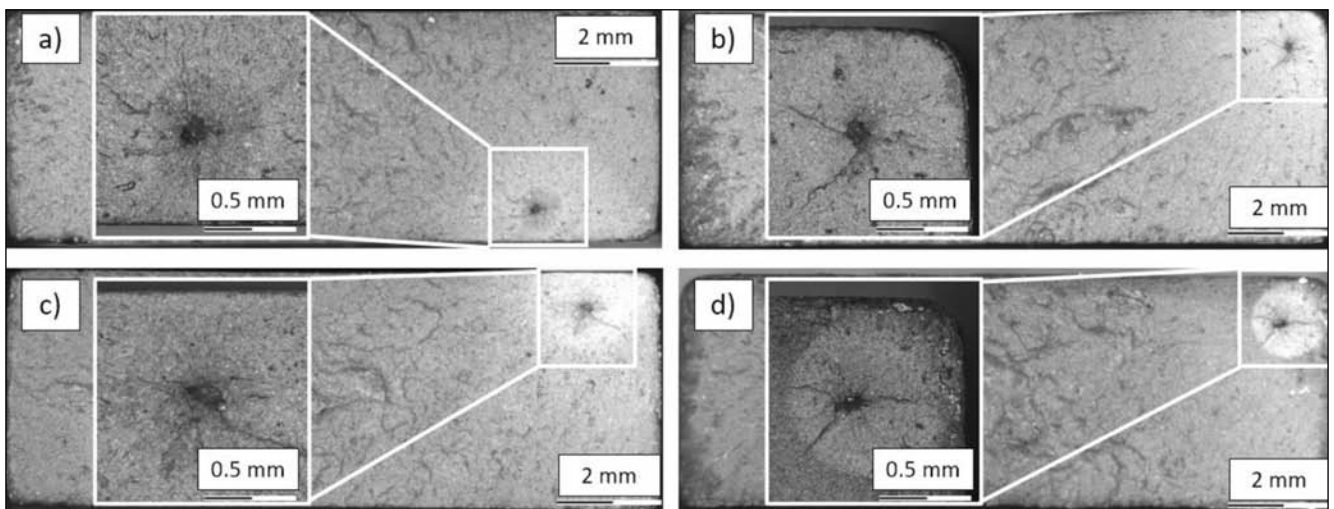
kívüli hibák miatt nem okoztak tönkremenetelt. A nagyméretű, térfogati zsugorodás képét mutató hibák jellemzően a darab belsejében, a terhelt zónától távol helyezkedtek el. Az apró, szinte teljesen gömbszerűnek megjelenített hibák méretük és kisebb feszültségkoncentrációs jellegük miatt nem voltak veszélyesek, illetve ezek a finomszerkezetű kéregtől távol helyezkedtek el. A CT-vizsgálat fizikai korlátai miatt fontos kiemelni, hogy a 8-12 voxel méretű, azaz 25-50  $\mu\text{m}$  élhosszúságú kockák megjelenítése már nem tud kellően pontos lenni a kiértékelő algoritmus statisztikai háttéré miatt.

Összegezve a CT-vizsgálat és a fárasztóvizsgálat adatpárosítást megfigyelhető, hogy a tönkremenetel erősen függ a hiba pozíciójától, a hiba sajátosságaitól és típusától. Ahol a hiba pozíciója a darab terhelt zónáján belüli elhelyezkedését jelenti. A hiba sajátosságai a gömbölyűség, alak tényező és a méret. A hiba típusa a VDG P202 [24] alapján, a hiba átmérő paramétere, gáz vagy zsugorodás okozta keletkezése, morfológiája önálló vagy felhőszerű, megjelenése lokális vagy eloszló.

A CT-vizsgálat alapján párosított és fénymikroszkóppal detektált egyes hibák képeit a 8. ábra mutatja. A fénymikroszkópos vizsgálat érdekes megfigyelése, hogy az adott porozitás közel volt az öntvény felszínéhez, de nem érintkezett azzal. A kifáradást okozó repedés azonban mégsem a felszínről, hanem az öntvényhibából indult el. A vizsgálat alapján ez az érték  $0,63 \pm 0,22$  mm volt a felszíntől.

#### 4. Következtetések

Az AlSi9Cu3(Fe) alumíniumból vákuumos kilevegőzéssel és vákuumos kilevegőzés nélkül gyártott próbatesteket fárasztottuk  $R = -1$  és  $R = 0,1$  terhelésszimmetria-tényezővel a Wöhler-görbe élettartamszakaszában. A próbatesteket előzetesen CT-vel vizsgáltuk, végül az eredményeket összevetettük a töretfelületekkel. A tanulmányban ismertetett vizsgálati körülmények mellett a következő megállapítások tehetők.



■ 8. ábra. Fénymikroszkópos hibaképek, a felülethez képesti elhelyezkedésük szerint: a) AP12; b) AP17; c) AP28 és d) AP29 próbatest.

A vákuumos kilevegőzés nélkül gyártott próbatetek 45%-a, a vákuumos kilevegőzéssel gyártott próbatetek 87,5%-a öntési hibától mentesen fáradt ki. A vákuumos kilevegőzéssel gyártott próbatetek 50%-os megbízhatóságon vett kifáradási ciklusszáma 20%-kal növekedett  $R = -1$  terhelésszimmetria, és 16%-kal növekedett  $R = 0,1$  terhelésszimmetria esetén a vákuumos kilevegőzés nélkül gyártott darabokhoz képest.

Az öntési hibával terhelt tönkremenetelek esetében a kifáradás egy konkrét területre koncentrálódott, ezekben az esetekben a hiba oka gázporozitás volt. Az ilyen módon kifáradt próbatetek a kifáradást okozó inhomogenitásoknál nagyobbakat is tartalmaztak. A detektált hibák nagy száma miatt az inhomogenitások alakját jellemző paramétereket vezettünk be (gömbölyűség, alaktényező). A tanulmányban vizsgált próbatetek tönkremenetelért felelős hibák az említett paraméterek tartományával jellemezhető (vákuumos rásegítés nélkül/vákuumos kilevegőzéssel):

gömbölyűség: 0,40–0,62 / 0,47–0,54;

forma tényező: 2,1–5,0 / 2,9–4,2;

hibaméret: 54–649 / 140–177.

A zsugorporozítás, figyelembe véve annak az alakját és a méretét is, a legérzékenyebb öntési hiba. Azonban a detektálása a számszerű CT-eredmények között nem magától értetődő, az eredmények vizuális ellenőrzése elengedhetetlen. Meghatározó továbbá a zsugorporozítás alakja, orientációja és morfológiája.

A terhelt zóna porozítására visszavezethető kifáradási repedések nem a felületről indultak ki, szemben a hibamentes (a felületről kiinduló, klasszikus) kifáradással, hanem az öntött kéreg finomszemcsés réteg alatti anyagfolytonossági hibáiból, amelyek átlagos távolsága a felületről  $0,63 \pm 0,22$  mm volt.

## Köszönetnyilvánítás

A kísérletek megvalósításában nyújtott segítségért köszönetet mondunk a Fémalk Zrt.-nek.

## Irodalom

- [1] Shannon Wetzel: Emission Reduction Possibilities With Structural Castings, Global Casting Magazine, (2015.) 46–53. old.
- [2] J. Linder: The influence of surrounding environment on the fatigue properties for a high pressure die cast AlSi9Cu3 alloy, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2007; 30:8, 759–765.
- [3] H. K. Govindaraju, T. Jayaraju, P. R. Sadandra Rao, Fatigue crack propagation behavior of Al–Zn–Ce alloys, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2011; 34:8, 547–561.
- [4] Léránth Gábor, Barkóczy Péter: Nyomásos öntvények vizsgálata, Anyagmérnöki Tudományok, 37. kötet, 1. szám (2012.), 277–284. old.
- [5] Imade Koutiri, Daniel Bellett, Franck Morel, Louis Augustins, Jérôme Adrien: High cycle fatigue damage mechanisms in cast aluminum subject to complex loads, International Journal of Fatigue, 2013; 47, 44–57.
- [6] Antonio Rotella, Yves Nadot, Mickael Piellard, Rémi Augustin, Michel Fleuriot: Fatigue limit of a cast Al–Si–Mg alloy (A357-T6) with natural casting shrinkages using ASTM standard X-ray inspection, International Journal of Fatigue, 2018; 114, 177–188.
- [7] Dúl Jenő: Nyomásos öntészeti ismeretek, (TÁMOP-4.1.2-08/1/A-2009-0001) 20–62. old.
- [8] Leskó Zsolt, Dúl Jenő: Az összetétel és a falvastagság hatása a nyomásos öntvények mechanikai tulajdonságaira, BKL Kohászat, 2013. (146. évf.) 5-6. sz. 14–19. old.
- [9] L. Lattanzi, A. Fabrizi, A. Fortini, M. Merlin, G. Timelli: Effect of microstructure and casting defects on the fatigue behavior of the high-pressure diecast AlSi9Cu3(Fe) alloy, Procedia Structural Integrity, 2017; 505–512.
- [10] Szalva Péter, Orbulov Imre Norbert: A vákuumos kilevegőzés hatása a nyomásos alumíniumöntvények mechanikai tulajdonságaira, BKL Kohászat, 2019. 5-6. sz., 9–14. old.
- [11] A. Ben Ahmed, M. I. Houria, R. Fathallah, H. Sidhom: The effect of interacting defects on the HCF behavior of Al–Si–Mg aluminum alloys, Journal of Alloys and Compounds, 2019; 779, 618–629.
- [12] Jenő Dúl, Zsolt Leskó: Effect of composition and wall thickness on mechanical properties of high pressure die castings, Material Science Forum Vols. 790–791, 2014., 241–246. old.
- [13] Xixi Dong, Xiangzhen Zhu, Shouxun Ji: Effect of super vacuum assisted high pressure die casting on the repeatability of mechanical properties of Al–Si–Mg–Mn die-cast alloys, Journal of Materials Processing Tech., 2019; 266, 105–113.
- [14] Angela Cantatore, Pavel Müller: Introduction to computed tomography, Technical University of Denmark, 2011; 12–22.
- [15] M. Wicke, A. Brueckner-Foit, T. Kristen, M. Zimmermann, F. Buelbuel, H.-J. Christ: Near-threshold crack extension mechanism in an aluminum alloy studied by sem and X-ray tomography, International Journal of Fatigue, 2019; 119., 102–111.
- [16] Alexandra Kraemer, Gisela Lanza: Methodology for the evaluation of CT image quality in dimensional metrology, 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), 2016.
- [17] Gianni Nicoletto, Radomila Konečná, Stanislava Fintova: Characterization of microshrinkage casting defects of Al–Si alloys by X-ray computed tomography and metallography, International Journal of Fatigue 2012; 41 39–46.
- [18] Qian Wan, Haidong Zhao, Chun Zou: Effect of Micro-porosities on Fatigue Behavior in Aluminum Die Castings by 3D X-ray Tomography Inspection, ISIJ International, 2014; 54, 511–515.
- [19] EN 1706:2013-12: Aluminium and aluminium alloys – Castings: Chemical composition and mechanical properties (2013)
- [20] ASTM E466-2015: Metallic materials – Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests (2015)
- [21] Dr. -Ing. Werner Hesse: Key to Aluminium Alloys (Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2008) p. 88
- [22] David C. Jiles: Introduction to the Principles of Materials Evaluation, Wolfson Center for Magnetic, Institute for Advanced Materials and Energy Systems, Cardiff University, U.K., 2007.; 79–97.
- [23] VGStudioMAX 3.2 Software (VG.034-EN.v03\_B I 11.2014.), Volume Graphics GMBH, Heidelberg, Germany, 2014;
- [24] VDG P202: Volume Deficit of Castings Made from Aluminium, Magnesium, and Zinc Casting Alloys – VDG Specification, 2014.
- [25] B. Oberdorfer, E. Kaschnitz, D. Habe, H. Holzer, G. Schindlbacher, P. Schumacher: New method of enhanced quality assessment for Al-castings by computed tomography, Proceedings 5th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2014, Wels, Austria, Shaker Verlag 2014; 133.
- [26] Imade Koutiri, Daniel Bellett, Franck Morel, Louis Augustins, Jérôme Adrien: High cycle fatigue damage mechanisms in cast aluminum subject to complex loads, International Journal of Fatigue, 2013; 47, 44–57.
- [27] John Campbell: Castings (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003) 314–318.