

Mátrixanyagukban erősített, kerámia gömbhéjjal töltött, szintaktikus fémhabok

Reinforced Matrix Syntactic Foams Filled with Ceramic Hollow Spheres

Maróti János Endre,^{1, 2,a} Szovák Benedek,^{2,b} Orbulov Imre Norbert^{1, 2,c}

¹ MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország

^a maroti.janos.endre@gpk.bme.hu, ^b szovak.benedek@edu.bme.hu, ^c orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu

Abstract

Metal matrix syntactic foams are cellular materials in which the matrix is metal and within that matrix are non-metallic cells formed by filler material. These materials have low density, and besides that, they have high compressive strength and energy absorption. The main goal was to improve these properties by reinforcing the matrix with ceramic grains. During the experiment, molten A356 aluminium (7Si-0,3Mg) was infiltrated between the mixture of the filler and the reinforcement material. The specimens were produced with low-pressure infiltration. Different reinforcement materials were used: aluminium-oxide with three different grain sizes and colour designations and one type of silicon carbide. After heat-treatment, standardised compression tests were executed on the specimens. The results were compared to the results of the non-reinforced samples.

Keywords: *syntactic metal foam, reinforcement in matrix material, compression test.*

Összefoglalás

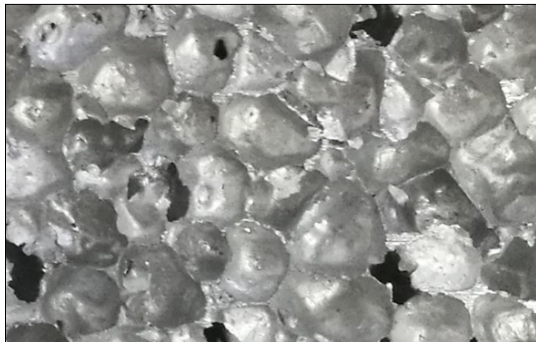
A szintaktikus fémhabok olyan cellás szerkezetű anyagok, amelyekben a mátrixanyag fém, és ebben a befoglaló anyagban találhatóak töltőanyag bejuttatásával kialakított cellák. Ezek az anyagok kis sűrűségük mellett jó törőszilárdsággal és energiaelnyelő képességgel rendelkeznek. Ezen tulajdonságok javítását céloztuk meg a kutatás során kerámia erősítőanyag mátrixanyagba való bejuttatásával. A kísérletek során C795 alumínium-oxid kerámia gömbhéj töltőanyag és kerámia erősítőanyag keveréke közé infiltráltunk A356 alumínium-ötvözet (7Si-0,3Mg) olvadékot. A gyártást kisnyomásos infiltrációs öntéssel végeztük. Több eltérő erősítőanyagot vizsgáltunk, három eltérő szemcseméretű alumínium-oxidot és egy típusú szilícium-karbidot. A mintákat hőkezeltük, majd szabványos zömítővizsgálatnak vetettük alá. A mérések során kapott eredményeket az erősítetlen minták eredményeivel hasonlítottuk össze.

Kulcsszavak: *szintaktikus fémhab, mátrixanyagában erősítés fémhab, zömítővizsgálat.*

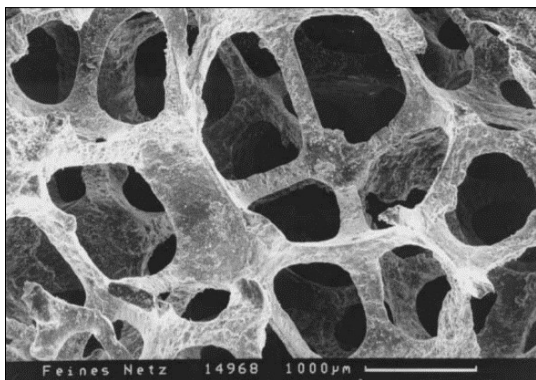
1. Bevezetés

Napjainkban mérnöki felhasználási területen egyre jobban teret nyernek a porózus, cellás szerkezetű anyagok, ezek egyik csoportja a mi kutatásunk témája: a fémhabok. Térnyerésüket kis sűrűségüknek, nagy energiaelnyelő képességüknek és szilárdságuknak köszönhetik.

A fémhabokat szerkezetük alapján két csoportra oszthatjuk: nyílt és zárt cellás anyagokra. A különbség a két csoport között, mint az a nevékből is következik, hogy az anyagban található cellák mennyire különböznek el egymástól. A zárt cellás habok (1. ábra) esetén az egyes üregek teljesen elhatárolódnak egymástól, míg nyílt cellás habok



1. ábra. Zárt cellás fémhabról készült felvétel



2. ábra. Nyílt cellás fémhabról készült felvétel [1]

(2. ábra) esetén az egymás melletti cellák között nincs anyaghatár, az anyaghiányos területek összeérnek.

A korábban említett tulajdonságok további javítására, illetve a felhasználási terület által indokolt lokális módosítására többféle módszert is kidolgoztak. E habokat az angol nyelvű szakirodalom funkcionális fémhabnak nevezi, ahol a cél a fémhab előbb említett előnyei mellett általában a szerkezetből adódó előnyök kialakítása. Erre példa a csővel körülvelet, fémhabalapú kompozitok gyártása, amely szerkezetek ellenállnak a hajlító igénybevételnek is [2], illetve a töltőanyag eloszlásának és mennyiségének változtatása a fémhab különböző részein előre meghatározott módon [3–5].

A szilárdsági tulajdonságok változtathatóak továbbá azonos anyagú, de eltérő méretű, illetve eltérő fajtájú töltőanyagok keverékének alkalmazásával. A szilárdsági tulajdonságok változtathatók azonos anyagú, de eltérő méretű töltőanyagok alkalmazásával vagy különböző anyagú töltőanyagok keverésével [6–8]. Nem erősített habok esetén ez a gyártási paraméterek változtatásával érhető el [9].

Kutatásunk fő célja egy új kutatási terület vizsgálata, a mátrixanyagában erősített szintaktikus fémhabok gyártása és fejlesztése, valamint mechanikai tulajdonságaik feltérképezése kváziszintaktikus zömítővizsgálattal.

Kerámia nano- és mikrorészecskéket sikeresen alkalmaztak tömör kompozitok esetén [10–12]. Esetünkben a nano-, illetve mikromérettartomány-beli erősítőanyag alkalmazása nem lehetséges, mivel az infiltrálás közben rosszul keveredne a milliméteres mérettartományú töltőanyaggal, és az olvadék leszorítaná a minta aljára. Ettől függetlenül a kerámiaszemcsék tulajdonságait figyelembe véve azt a hipotézist állítottuk fel, hogy a 0,1–1 mm mérettartomány-beli szemcseméretű erősítőanyag is javítani fogja a vizsgált mechanikai tulajdonságokat.

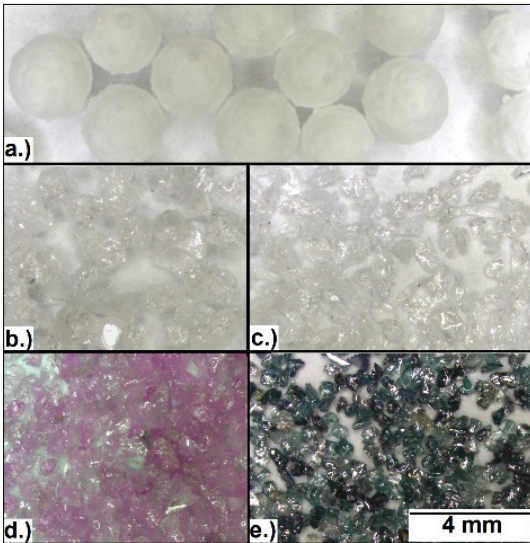
2. Anyagok és módszerek

2.1. Felhasznált anyagok

Kutatásunk során A356 alumíniumötvözet (7Si-0,3Mg) mátrixanyagot használtunk. Töltőanyagként a Hollomet GmbH által forgalmazott Globocer® kerámia gömbhéjat alkalmaztunk. A kerámia gömbhéjak anyaga C795 jelölésű alumínium-oxid, átmérője $2,29 \pm 0,16$ mm [13, 14]. A gömbhéj üreges belseje adja majd a fémhab porozitását. Az erősítőanyag szerepét a Granit Csiszolószerszámgyártó Kft.-től beszerzett, csiszolóanyagként forgalmazott Al_2O_3 - és SiC-szemcsék töltötték be. A töltőanyagról és az erősítőanyagokról készült sztereomikroszkópos felvételek a 3. ábrán láthatók. Az erősítőanyagok névleges méretét a gyártó által megadott szitasor alapján tudjuk, amely egy intervallumot ad meg, a pontos méret meghatározásának érdekében a készített mikroszkópos felvételeket értékeltük ki, az eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Az erősítőanyagok átlagos szemcseméretei

Erősítő anyag	Névleges méret (mm)	Mért méret (mm)
FS 18 Al_2O_3	FS 18 (1 mm – 1,4 mm)	1,20±0,21
FS 40 Al_2O_3	FS 40 (0,4 mm – 0,7 mm)	0,63±0,09
FS 46 Al_2O_3	FS 46 (0,35 mm – 0,6 mm)	0,51±0,08
FS 46 SiC	FS 46 (0,35 mm – 0,6 mm)	0,45±0,09



3. ábra. Töltőanyag (a), FS 18 Al_2O_3 (b), FS 40 Al_2O_3 (c), FS 46 Al_2O_3 (d), és FS 46 SiC (e) sztereomikroszkóp felvétele

2.2. Vizsgálati próbatetek gyártása

Minden vizsgált minta esetén 20% térfogatrésznyi erősítőanyagot alkalmaztunk. Az erősítőanyagot és a töltőanyagot kézi keveréssel elegyítettük, amíg szemrevételezés alapján megállapítottuk, hogy megfelelő mértékben eloszlott az erősítőanyag a töltőanyag közt.

A felhasznált $40 \times 50 \times 240$ mm befoglaló méretű öntőminták belső felületét grafitlakkal kezeltük az öntvény eltávolításának megkönnyítése végett, ehhez grafitzsprét használtunk. A minta gázatlanító furatát alumínium-oxid paplannal tömítettük, amely lehetővé teszi az öntés során a töltőanyag közé rekedt levegő távozását, de megakadályozza az olvadékkiváramlást.

A keveréket öntőmintába való betöltése után felül acélhálóval rögzítettük. Ez azért szükséges, mivel a töltőanyag olvadékhoz viszonyított kis sűrűsége miatt felúszna annak tetejére, ami inhomogenitási problémákat okozna. Ezután a betöltött öntőmintákat kemencében előhevítettük 600 °C-ra, és ezen a hőmérsékleten 1 órán át hőn tartottuk.

Az A356 (7Si-0,3Mg) mátrixanyagot indukciós kemencében olvasztottuk meg, és kis viszkozitású olvadékállapotig hevítettük. A kemence kikapcsolása után az olvadék-hőmérsékletet digitális hőmérővel mérve 840 °C-on az olvadékot beöntöttük az öntőmintába. Ezt követően ráhelyeztük a gázbevezető pipát, ezzel együtt rögzítettük a megfogó keretben, végül ráengedtük az argon-

gázt 5 bar nyomáson. Ez átréselte az olvadékot a keverékünk között.

A mintákat levegőn hűtöttük le, a tömböket vágótárcsával vágtuk ki az egyszer használatos öntőmintákból. Az egyes tömbökből 4-4 darab, $30 \times 30 \times 40$ mm befoglaló méretű próbatestet munkáltunk ki zömítés, illetve 10 mm vastag mintákat mikroszerkezeti vizsgálat céljára.

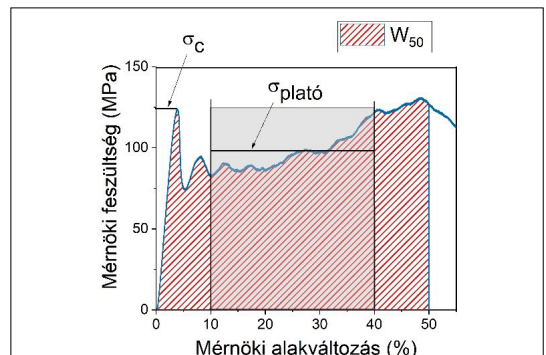
A mintákat T6-os, kiválásos keményítő hőkezelésnek vetettük alá szilárdságnövelés céljából. Első lépésként 300 °C/óra sebességgel hevítettük 535 °C-ra, ezen a hőmérsékleten 4 órán át hőn tartottuk, majd vízben hűtöttük, ezzel homogenizálva a munkadarabokat. Második lépésként 200 °C/óra sebességgel hevítettük 150 °C-ig, 15 órán át hőn tartottuk, majd vízben hűtöttük [15], ez szolgált mesterséges öregítésként.

2.3. Mérési módszerek

A mikroszerkezeti vizsgálatra szánt mintákat csiszoltuk (P60-P4000 csiszolópapírral) és políroztuk ($3 \mu\text{m}$ -es és $1 \mu\text{m}$ -es szemcsenagyságú gyémántszuszpenzió), majd fémmikroszkópon és sztereomikroszkópon vizsgálatot végeztünk.

A kimunkált próbatesteket ISO 13314:2011 [16] szerinti szabványos zömítővizsgálatnak vetettük alá a mechanikai tulajdonságok meghatározására. A kvázisztatikus zömítővizsgálatot MTS 810 univerzális, hidraulikus anyagvizsgáló gépen végeztük 250 kN-os erőmérő cellával. A vizsgálat 4 mm/perc keresztfej-elmozdulási sebességgel legalább 50% alakváltozásig tartott. A súrlódás csökkentése érdekében $0,3$ mm vastagságú Kolofole-nylon fóliát helyeztünk a nyomószerszám és a próbatest érintkező felületei közé.

A zömítővizsgálat során kapott erő-keresztfej-elmozdulás adatpárok felhasználásával mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás görbéket ábrázoltunk (4. ábra), amelyeken vizsgáltuk a



4. ábra. A vizsgált mechanikai tulajdonságok értelmezése

törőszilárdságot (σ_c), ami a zömítőgörbe első lokális maximuma, a platófeszültséget ($\sigma_{\text{plató}}$), amit a 10% és 40% alakváltozás közti átlagos feszültségértékként határoztunk meg, és az 50%-os alakváltozásig elnyelt energiát (W_{50}), amely a görbe alatti terület az említett 50% alakváltozási határig.

3. Eredmények

A mikroszerkezeti vizsgálatok során megállapítottuk, hogy a mátrix és a töltőanyag, illetve a mátrix és az erősítőanyag közt megfelelő kapcsolat alakul ki infiltrálás során, nagyméretű porozitási és felületi kiválási hibák nem jöttek létre (5. ábra).

A minták előkészítése során abba a problémába ütköztünk, hogy csiszolás során a nagy keménységű erősítő- és töltőanyag kifordított szemcséket a csiszolópapírból.

Az erősített minták vizsgálata során kapott görbéket összehasonlítva az erősítetlen minta görbéjével láthatjuk, hogy az erősítőanyag minden esetben növelte a törőszilárdságot. A platótartományban azonban az erősítetlen szintaktikus fémhab görbéje monoton növekedő jelleget mutat az erősítettekével ellentétben (6. ábra).

A vizsgálatok eredményeit táblázatos formában foglaltuk össze (2. táblázat).

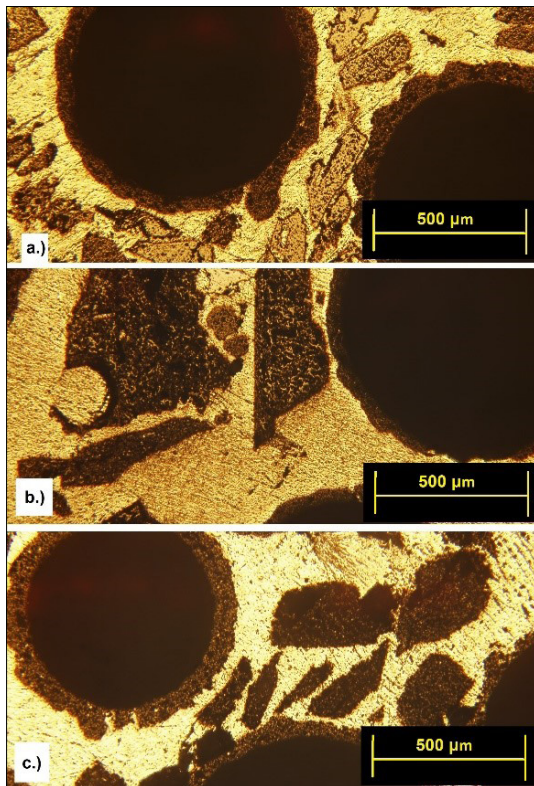
2. táblázat. A vizsgált tulajdonságok átlagértékei

	Sűrűség (g/cm ³)	σ_c (MPa)	W_{50} (J/cm ³)
Erősítetlen	1,65±0,02	108,24±6,49	44,50±2,49
FS 46 SiC	1,78±0,06	124,94±4,61	39,50±4,65
FS 40 Al ₂ O ₃	1,85±0,08	133,11±2,67	41,23±2,13
FS 46 Al ₂ O ₃	1,79±0,08	116,42±9,83	36,42±4,20
FS 18 Al ₂ O ₃	1,88±0,07	133,76±7,79	43,90±3,21

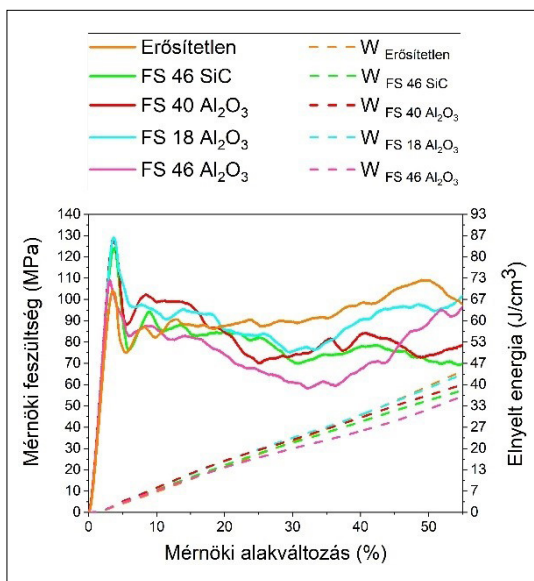
A görbék kiértékelése során azt az eredményt kaptuk, hogy az erősített minták a rugalmas alakváltozási szakaszban több energiát képesek elnyelni, mint az erősítetlen, mivel nagyobb feszültségértékeket érnek el. A legtöbb energiát az erősítetlen minta nyelte el az 50% alakváltozási határig, mivel az erősítőanyag adagolásával ridegebbé vált az anyag, ebből kifolyólag a képlékeny alakváltozási szakaszban kevesebb energiát képes elnyelni.

4. Következtetések

A kutatásunk során kapott eredményekből az alábbi következtetésekre jutottunk:



5. ábra. A kialakult szerkezet FS 46 SiC (a), FS 18 Al₂O₃ (b) és FS 40 Al₂O₃ (c) erősítőanyag alkalmazása esetén (fém-mikroszkópi felvétel)



6. ábra. Az egyes próbatetek mérnöki feszültség–mérnöki alakváltozás és elnyelt energia–mérnöki alakváltozás görbéi

- Az infiltrálás alkalmas eljárás mátrixanyagában erősített szintaktikus fémhabok gyártására, az erősítőanyag megfelelő mértékben, egyenletesen eloszlik a töltőanyag között.
- Megfelelő szerkezet alakul ki, nem jelentkeznek határfelületi kiválások vagy porozitási hibák.
- Nem minden esetben érdemes erősítőanyagot alkalmazni:
 - A kerámia töltőanyag önmagában jó mechanikai tulajdonságokat biztosít.
 - Elsősorban a törőszilárdság növelésére alkalmas az erősítőanyag, átlagosan több mint 17%-kal növeltük a törőszilárdságot.
 - Az általunk használt erősítőanyagok közül az FS 18 Al₂O₃ érte el a legnagyobb szilárdságot.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutatás a BME-NVA-02. számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg, valamint a kutatást támogatta az NKFH Alap (TKP2020 IES, tsz: BME-IE-NAT; TKP2020 NC, tsz: BME-NCS) az Innovációs és Technológiai Minisztérium vezetése alatt. Ezt a munkát részben az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok támogatta az OTKA-FK_21 138505 támogatási szerződés keretében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] J. Banhart: *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams*. Progress in Materials Science, 46/6. (2001) 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
- [2] Kincses D. B., Károly D., Bukor Cs.: *Production and testing of syntactic metal foams with graded filler volume*. Materials Today: Proceedings, 45. (2021) 4225–4228. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.163>
- [3] Kemény A., Leveles B., Kincses D. B., Károly D.: *Manufacturing and Investigation of In Situ and Ex Situ Produced Aluminum Matrix Foam-Filled Tubes*. Advanced Engineering Materials, 24/1. (2022) 2100365. <https://doi.org/10.1002/adem.202100365>
- [4] Kincses D. B., Kemény A., Leveles B., Károly D.: *Csővel körülölelt fémhabalapú kompozitok gyártása, hőkezelése és vizsgálata*. Acta Materialia Transylvanica, 4/2. (2021) 93–96. <https://doi.org/10.33923/amt-2021-02-07>
- [5] Movahedi N., Conway S., Belova I. V., Murch G. E., Fiedler T.: *Influence of particle arrangement on the compression of functionally graded metal syntactic foams*. Materials Science and Engineering: A, 764. (2019) <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138242>
- [6] Kemény A., Leveles B., Bubonyi T., Orbulov I. N.: *Effect of particle size and volume ratio of hollow spheres on the mechanical properties of bimodal composite metal foams*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 140. (2021) <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106152>
- [7] Orbulov I. N., Dobránszky J.: *Producing metal matrix syntactic foams by pressure infiltration*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 52/1. (2008) 35–42. <https://doi.org/10.3311/pp.me.2008-1.06>
- [8] Muhammad A. N., Gábora A., Mankovits T.: *Influence of the Manufacturing Parameters on the Compressive Properties of Closed Cell Aluminium Foams*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 64/2. (2020) 172–178. <https://doi.org/10.3311/PPme.16195>
- [9] Zamanai N. A. B. N., Iqbal A. K. M. A., Nuruzaman D. M.: *Fabrication and characterization of Al₂O₃ nanoparticle reinforced aluminium matrix composite via powder metallurgy*. Materials Today: Proceedings, 29/1. (2020) 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.541>
- [10] Sivananthan S., Ravi K., Samuel C. S. J.: *Effect of SiC particles reinforcement on mechanical properties of aluminium 6061 alloy processed using stir casting route*. Materials Today: Proceedings, 21/1. (2020), 968–970. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.068>
- [11] Zaiemyekheh Z., Liaghata G. H., Ahmadi H., Khan M. K., Razmakhah O.: *Effect of strain rate on deformation behavior of aluminum matrix composites with Al₂O₃ nanoparticles*. Materials Science & Engineering: A, 753. (2019), 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.052>
- [12] Dhanashekar M., Loganathan P., Ayyanar S., Mohan S. R., Sathish T.: *Mechanical and wear behaviour of AA6061/SiC composites fabricated by powder metallurgy method*. Materials Today: Proceedings, 21/1. (2020), 1008–1012. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.052>
- [13] ASM Handbook. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials; ASM International: Materials Park, OH, USA, 1995; Volume 2.
- [14] Szlancsik A., Katona B., Kemény A.: *On the Filler Materials of Metal Matrix Syntactic Foams*. Materials, 12/12. (2019), 2023. <https://doi.org/10.3390/ma12122023>
- [15] Peng J., Tang X., He J. Xu D.: *Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of A356 alloys*. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 21. (2011) 1950–1956. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60955-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60955-2)
- [16] ISO 13314:2011 – Mechanical testing of metals – Ductility testing – Compression test for porous and cellular metals. ISO133122011 – Mech. Test. Met. – Ductility Test. – Compression Test Porous Cell. Met. 2011.