



Részecskeerősítésű nyílt cellás fémhabok

Particle Reinforced, Open Cell Metal Foams

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

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország

² MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

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

Abstract

Salt replicated metal matrix foams are cellular materials with interconnected cells. These materials have some highly specific mechanical properties. They are capable of absorbing high amount of energy during compression. The main goal of this study was to increase these mechanical properties without drastically increasing density with the application of ceramic particles as reinforcing material. In this research salt-replicated metal foams with particle reinforced cell walls were successfully created with pressure infiltration. The energy absorption capacity, the plateau stress and in some cases the specific values were increased approximately by 10 % to 41 % by particle reinforcement.

Keywords: *metallic foam, open cell foam, reinforcement material.*

Összefoglalás

A nyílt cellás fémhabok olyan cellás szerkezetű anyagok, amelyeken belül a cellák összeérnek. Ezeknek az anyagoknak egyes, a sűrűsége fajlagos mechanikai tulajdonságai kiválóak. Nagy mennyiségű energiát képesek elnyelni alakváltozáskor. A kutatás során sikeresen állítottunk elő cellaéleiben részecskével erősített nyílt cellás fémhabot nyomásos infiltrálással. A mechanikai vizsgálatok eredményeiből látható, hogy a kerámia erősítőanyag 10% és 41% közötti értékkel növelte az elnyelt energia mennyiségét és a platófeszültséget, valamint egyes esetekben a sűrűséggel normál platófeszültséget és az elnyelt energia mennyiségét.

Kulcsszavak: *fémhab, nyílt cellás hab, erősítőanyag.*

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben az anyagtudomány egyik fő iránya a mérnöki anyagok tömeggel normált mechanikai tulajdonságainak optimalizálása volt.

Ennek egyik irányzata a tömeg, illetve a sűrűség csökkentése, amely a cellás szerkezetű anyagok, például fémhabok alkalmazásához vezetett [1]. Ezek az anyagok kis sűrűségűek, és emellett nagy az energiaelnyelő képességük [2]. A fémhabokat cellaszerkezetük alapján három fő csoportba sorolják, eszerint lehetnek: zárt cellás szerkezetű habok [2], nyílt cellás szerkezetű habok [2, 3] és szintaktikus habok [4–7].

Másik lehetőség a mechanikai tulajdonságok

javítása a tömeg jelentős növelésének elkerülése mellett. Ilyen anyagok a kompozitok, ahol egy kis sűrűségű, kis szilárdságú mátrixanyagba, például alumíniumötvözetbe ágyaznak kis mennyiségű, nagy szilárdságú erősítőanyagot. Ezek az erősítőanyagok lehetnek részecskék, például alumínium-oxid vagy szilícium-karbid vagy szálak [8–11].

A két módszer kombinálására korlátozott mennyiségű irodalmi forrás áll rendelkezésre. Ezekben az irodalmi forrásokban szemcsés kerámia erősítőanyagot alkalmaztak szintaktikus alumíniumhabok mátrixanyagának megerősítésére [12, 13]. A kutatások során megállapították, hogy a kerámia erősítőanyag növeli a fémhabok nyomószilárdságát, azonban csökkenti a platófeszültséget

és az 50% alakváltozásig elnyelt energiát. Ebből kifolyólag a kerámia erősítőanyag alkalmazása csak bizonyos esetekben indokolt szintaktikus fémhabok esetén [12, 13].

Ebben a kutatásban cellaélekben kerámiarészecske-erősítésű, nyílt cellás alumíniumhabokat készítettünk, és azt vizsgáltuk, hogy az erősítőanyag milyen hatást fejt ki a fémhab mechanikai tulajdonságaira.

2. Anyagok és módszerek

2.1. Felhasznált anyagok

Mátrixanyagként Al99,5 (ENAW-1050A) alumíniumot alkalmaztunk, anyagösszetétele (tömeg%): Al: 99,68; Si: 0,16; Fe: 0,1; Cu: 0,05; egyéb: 0,01. A mérést Zeiss EVO MA 10 típusú pásztázó elektronmikroszkópon végeztük, és 4 különböző mérés átlagaként állt elő.

Cellaképző anyagként sötét választottunk kis ára és könnyű elérhetősége miatt. Szitarsorral történő osztályozást követően 2,6–3 mm-es mérettartományba eső szemcséket használtunk, a cellaképző anyagról sztereomikroszkóppal készített kép az 1. ábrán látható. Erősítőanyagként 0,35–0,60 mm névleges méretű alumínium-oxidot és szilícium-karbidot adagoltunk (1. ábra b, c), a mátrixanyag térfogatának 20%-nyi térfogatban a cellaképző anyaghoz. Az erősítőanyagokat a Granit Csiszolószerszám Kft.-től [14] szereztük be.

A mikroszkópi képek alapján a cellaképző anyag $2,73 \pm 0,04$ mm átlagos szemcseméretű, az erősítőanyagok méreteit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

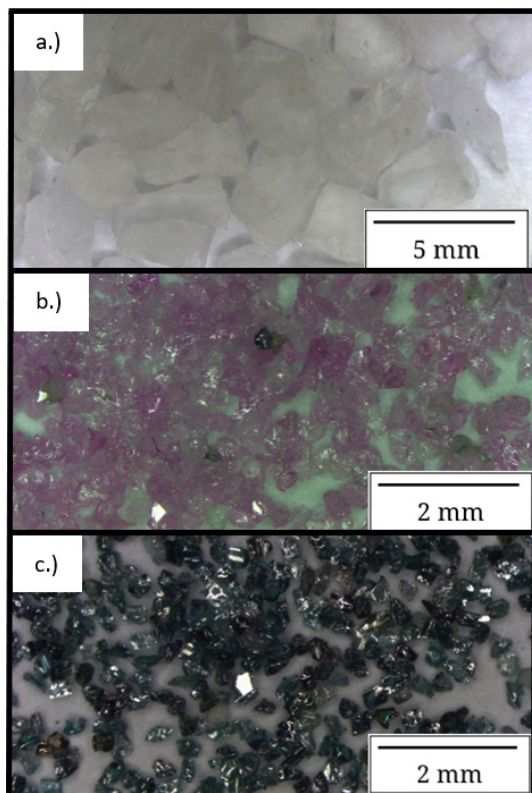
2.2. Felhasznált módszerek

A mintákat nyomásos infiltrálással vákuumkémencében állítottuk elő.

A cellaképző- és erősítőanyagokat kézi keveréssel elegyítettük, amíg szemrevételezés alapján megfelelőnek találtuk a keveredést. Az így elkészült keverékeket Due-Ci Electronic N-77 grafit spray-vel kezelt, $60 \times 60 \times 300$ mm befoglaló méretű, 2 mm falvastagságú, S235J acélból készült tégelyekbe töltöttük egymás tetejére, egymástól papír elválasztóval elválasztva, amely az infiltrálás közben kiég. Az összeállítást felülről 1.4301 acélhálós zártuk le, hogy megakadályozzuk a cellaképző- és az erősítőanyag ömledékbe történő felúszását infiltrálás közben. Az acélháló tetejére 2 mm vastag, alumínium-oxid kerámiaszálas paplant helyeztünk. A tégelyekbe behelyeztük a mátrixanyagot. Az összeállításról készült modellt a 3. ábrán mutatjuk be.

1. táblázat. A felhasznált erősítőanyagok névleges és mért szemcseméretei

Erősítőanyag	Gyártó által megadott mérettartomány (mm)	Mért szemcseméret (mm)
Al ₂ O ₃	0,35–0,60	0,52 ± 0,07
SiC	0,35–0,60	0,42 ± 0,06



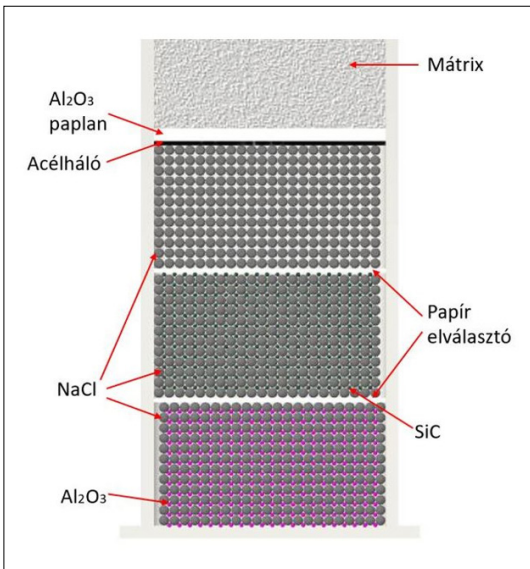
1. ábra. a) Cellaképző anyag, b) 0,35–0,60 mm szemcseméretű, alumínium-oxid erősítőanyag és c) 0,35–0,60 mm névleges méretű szilícium-karbid erősítőanyag sztereomikroszkópos képe



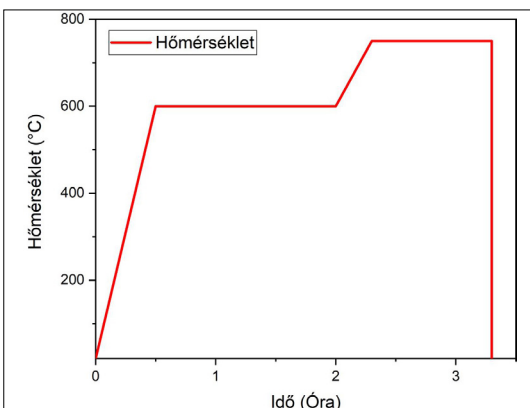
2. ábra. A kimunkált próbatestekről készült kép (balról jobbra Al₂O₃ erősítésű, nyílt cellás fémhab, SiC részecskével erősített, nyílt cellás fémhab, erősítés nélküli, nyílt cellás fémhab)

Az elkészült összeállítást vákuumkemencében melegítettük elő 600 °C-ra és 1,5 órán keresztül hűn tartottuk a vákuum felépülése alatt, a kemencében lévő vákuum nagyságrendje 10^{-4} Pa. Ezután 750 °C-ra hevítettük a kemencét, és 1 órán át hűn tartottuk, majd 5 bar nyomású argongázzal, 5 s-on keresztül elvégeztük az infiltrálást. Az infiltrálási hőmérséklet-idő diagramját a **4. ábra** mutatja.

Az elkészült darabot levegőn hűtöttük, majd a szobahőmérséklet elérése után kivágtuk a tégelyből. A próbatesteket Struers Discotom-10 típusú vágógépen vágtuk ki a teljes tömbből. A darabból $20 \times 20 \times 30$ mm befoglaló méretű próbatesteket munkáltunk ki, ezeket a **2. ábra** mutatja be. Első-



3. ábra. A gyártás során használt összeállítás modellje



4. ábra. A hőmérséklet elvi változása az idő függvényében

ként a munkadarabokat vízben áztattuk 72 óráig, folyamatos közegáram mellett a cellaképző anyag kioldása, így a nyílt cellás szerkezet kialakulása végett. Az elkészült próbatestek közül a vizuális vizsgálatra szánt darabokat P80-tól P2500-ig egyenletes eloszlásban szilícium-karbid szemcsés csiszolópapírokkal csiszoltuk, majd 3 μm -es gyémántszuszpenzióval políroztuk. A vizsgálatokat Olympus PMG-3 fémmikroszkóppal végeztük.

A mechanikai tulajdonságok meghatározására az ISO 13314:2011 szabvány [15] szerinti nyomóvizsgálatokat végeztünk. A vizsgálatokat MTS 810 típusú univerzális anyagvizsgáló gépen, 250kN-os erőmérőcellával végeztük. A kvázi statikus, egytengelyű nyomóvizsgálatot 3 mm/min keresztfejsebességgel legalább 50%-os mérnöki alakváltozásig végeztük. A nyomólapok és a próbatestek azokkal érintkező felületei közé 0,3 mm vastag Kolofol teflonfóliát tettünk szilárd kenésnek a súrlódás csökkentése érdekében.

3. Eredmények

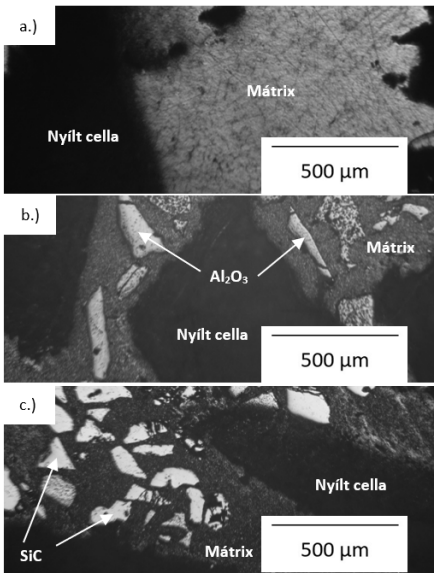
3.1. Mikroszkópos vizsgálat

A mikroszerkezeti vizsgálatok közben készült fémmikroszkópos felvételek az **5. ábrán** láthatóak.

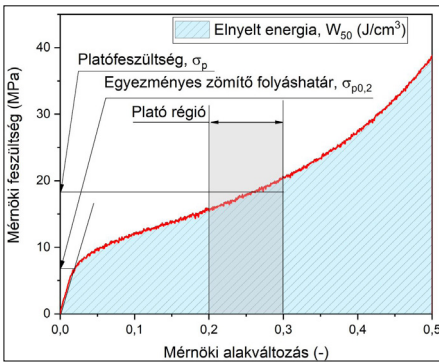
A mikroszerkezeti vizsgálatokból kiderül, hogy a mátrix (jelen esetben a cellafalak anyaga) és az erősítőanyag között jó kapcsolat alakult ki, nagyméretű porozitásokat és felületi hibákat, kiválasztásokat nem tapasztaltunk. Ebből az is következik, hogy az eljárás során megfelelő mértékben elosztható az erősítőanyag a cellaképző anyag szemcséi között. Az is jól látható a képeken, hogy a só jól kioldódott, a nyílt cellás szerkezet kialakult. Ezek alapján elmondhatjuk, hogy a nyomásos infiltrálás alkalmas részecskeerősítésű, nyílt cellás fémhabok készítésére.

3.2. Mechanikai vizsgálat

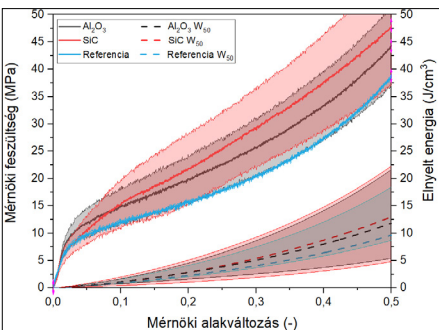
A vizsgálatok során erő-keresztfej-elmozdulás adatpárokat kaptunk. Ezekből a próbatestek kezdeti keresztmetszetének és magasságának felhasználásával mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramokat készítettünk. Ezen a diagramokon vizsgáltuk a mechanikai tulajdonságokat és azok sűrűséggel normált megfelelőit („f” kiegészítőindex). Ezek a következők: egyezményes nyomási folyáshatár ($\sigma_{p0,2}$, σ_{fp11}), ami a 0,2% mérnöki alakváltozáshoz tartozó feszültségérték, a platófeszültség (σ_{pl} , σ_{fpl}), amiként a 20% és 30% közti átlagos feszültségértéket határoztuk meg, és az 50% alakváltozásig egységnyi térfogat-



5. ábra. a) Erősítetlen, nyílt cellás fémháb (referencia), részecskeerősítésű, nyílt cellás fémhábok: b) Al_2O_3 , c) SiC (az ábrán nincs minden cella, mátrixanyag és erősítőanyag feltüntetve)



6. ábra. A vizsgált mechanikai tulajdonságok értelmezése



7. ábra. A nyomófeszültség és az 50% alakváltozásig egységnyi térfogatban elnyelt energia az alakváltozás függvényében

ban elnyelt energia (W_{50} , W_{f50}), ami a görbe alatti terület az 50%-os alakváltozási határig. Ezeket a mechanikai tulajdonságokat mutatja a 6. ábra.

A kutatásunk során típusonként három típusonként három próbatest kiátlagolt nyomógörbéit és az alakváltozás során egységnyi térfogatban elnyelt energia változását mutatja a 7. ábra az alakváltozás függvényében.

Elsőként az egyes próbatestek sűrűségét számoltuk ki.

A legfontosabb mechanikai tulajdonságok eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze.

A sűrűségek Al_2O_3 esetében 36%-ot, SiC használatával 19%-ot növekedtek a referencia fémhábhoz képest.

A további eredmények összehasonlításakor láthatjuk, hogy az erősítőanyagok alkalmazása növeli a platófeszültséget, Al_2O_3 erősítőanyag esetén 26%-kal, míg SiC esetén 41%-kal, és ugyancsak növeli az 50%-os alakváltozásig elnyelt energiát rendre 24%-kal és 36%-kal.

A trendet az egyezményes folyáshatár törli meg, ahol az Al_2O_3 esetében 27%-os növekedést tapasztalunk, azonban szilícium-karbid erősítőanyag használata mellett 11%-os csökkenés látható.

A sűrűséggel fajlagosított mechanikai mérőszámokat is megvizsgálva már nem ennyire egyértelműen pozitívak az erősítőanyag használatának hatásai. A platófeszültség és elnyelt energia esetén a SiC-erősítőanyag használatánál 13% és 10%-kal nőttek, azonban Al_2O_3 -részecskés erősítésnél mindkét mérőszám csökkent 8%-kal, illetve 10%-kal.

2. táblázat. A próbatestek fő mechanikai tulajdonságainak átlagértékei és szórásai

	σ_{pl1} (MPa)	σ_{pl} (MPa)	W_{50} (J/cm ³)
Ref.	6,40 ± 0,12	17,91 ± 0,19	9,66 ± 0,11
Al_2O_3	8,18 ± 0,52	22,93 ± 4,19	12 ± 97
SiC	5,78 ± 0,94	25,76 ± 6,18	13 ± 87
	σ_{fpl1} (MPa*cm ³ /g)	σ_{fpl} (MPa*cm ³ /g)	W_{f50} (J/g)
Ref.	5,40 ± 0,14	15,11 ± 0,16	8,15 ± 0,08
Al_2O_3	5,15 ± 0,27	14,08 ± 1,45	7,40 ± 0,63
SiC	3,98 ± 0,39	17,46 ± 2,81	8,94 ± 1,25
	Sűrűség (g/cm ³)		
Ref.	1,18 ± 0,01		
Al_2O_3	1,60 ± 0,12		
SiC	1,43 ± 0,11		

A sűrűséggel fajlagosított egyezményes zömítőhatár esetében, mindkét típusú erősítőanyag használatánál csökkenést tapasztaltunk, átlagosan 21%-kal.

Elmondható, hogy a szilícium-karbid mind a platófeszültség, mind az elnyelt energia esetén (és ezek fajlagos párjaiban is) növeli ezeket a tulajdonságokat. Egyedül az egyezményes nyomási folyáshatár és a fajlagos egyezményes nyomási folyáshatár esetében nem javított a referenciamintához képest.

4. Következtetések

A kutatás során a következő következtetéseket sikerült levonni:

- A nyomásos infiltrálás alkalmas eljárás mátrix anyagában erősített nyílt cellás fémhabok gyártására.
- Az Al_2O_3 erősítőanyag használata növelte az összes mérőszámot, azonban a fajlagos esetekben minden mérőszám esetén csökkentek az értékek a referenciamintához képest.
- Szilícium-karbid erősítőanyag esetében az egyezményes nyomási folyáshatárt és a fajlagos egyezményes nyomási folyáshatárt kivéve minden esetben jobbnak bizonyult a nyitott cellás fémhab vizsgált tulajdonsága, mint az erősítés nélküli nyílt cellás fémhabé.
- A vizsgált erősítőanyagok közül a szilícium-karbid alkalmazása bizonyult a legelőnyösebbnek.

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 a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH), támogatta az OTKA-FK_21 138505 támogatási szerződés keretében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kádár Cs., Kenesi P.: *Napjaink korszerű anyagai: a fémhabok*. Fizikai Szemle, 7-8. (2008) 279–281.
- [2] Hangai Y., Ando M., Ohashi M., Amagai K., Suzuki R., Matsubara M., Yoshikawa N.: *Compressive properties of two-layered aluminum foams with closed-cell and open-cell structures*. Materials Today Commun, 24. (2020) 101249. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101249>
- [3] San Marchi C., Mortensen A.: *Deformation of open-cell aluminum foam*. Acta Materialia, 49/19. (2001) 3959–3969. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00294-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00294-4)
- [4] Santa Maria J. A., Schultz B. F., Ferguson J. B., Rohatgi P. K.: *Al-Al₂O₃ syntactic foams - Part I: Effect of matrix strength and hollow sphere size on the quasi-static properties of Al-A206/Al₂O₃ syntactic foams*. Materials Science and Engineering: A, 582. (2013) 415–422. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.081>
- [5] Zukri A., Nazir R., Said K. N. M., Moayed H.: *Physical and mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate (LECA)*. MATEC Web Conf 2018; 250. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825001016>
- [6] Kincses D. B., Károly D., Bukor C.: *Production and testing of syntactic metal foams with graded filler volume*. Materials Today. Proc., 45. (2020) 4225–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.163>
- [7] Károly D., Iklódi Z., Kemény A., Kincses D. B., Orbulov I. N.: *Production and Functional Properties of Graded Al-Based Syntactic Metal Foams* 2022:1–12.
- [8] 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. (2019) 335–41. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.052>
- [9] Kumar N., Chittappa H. C., Ezhil Vannan S.: *Development of Aluminium-Nickel Coated Short Carbon Fiber Metal Matrix Composites*. Materials Today. Proc., 5. (2018) 11336–45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.100>
- [10] Zamani NABN, Asif Iqbal AKM, Nuruzzaman DM.: *Fabrication and characterization of Al₂O₃ nanoparticle reinforced aluminium matrix composite via powder metallurgy*. Materials Today. Proceedings, 29. (2019) 190–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.541>
- [11] Zaiemyekeh Z., Liaghat G. H., Ahmadi H., Khan M. K., Razmkhah O.: *Effect of strain rate on deformation behavior of aluminum matrix composites with Al₂O₃ nanoparticles*. Materials Science and Engineering: A, 753. (2019) 276–84. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.052>
- [12] Maróti J. E., Szovák B., Orbulov I. N.: *Reinforced Matrix Syntactic Foams Filled with Ceramic Hollow Spheres*. Acta Mater. Transylvanica 5. (2022) 18–22. <https://doi.org/10.33924/amt-2022-01-05>
- [13] Károly D., Maróti J. E., Lolbert-Szabó J., Kemény A., Orbulov I. N.: *Production of syntactic metal foams reinforced in the matrix material*. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2022; 1246:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1246/1/012014>
- [14] Granit Csiszolószerző Kft. <https://www.granit-net.hu/> (letöltve: 2023. július 8.).
- [15] ISO13314:2011 Mechanical testing of metals. Ductility testing. Compression test for porous and cellular metals.