

- [10] *Gillemot Ferenc*: Reaktortartályok neutronsugárzás okozta élettartam kimerülésének ellenőrzése *Gép*, 1979. (31. évf.) 7. sz. 244–247. old.
- [11] *B. T. Timofeev, G. P. Karzov*: Assessment of the WWER-440/V-213 reactor condition, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005. (vol. 83), 216–226. old., 2005.
- [12] *Janovec J., Petelová P.*: Materials and technology előadásjegyzet, Czech Technical University
- [13] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии »Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок«, NP-104-18, 2018. NP-104-18, 2018. Az atomenergia alkalmazásának területén érvényes, nukleáris erőművek berendezései és csővezetékei kötő- és felrakó hegesztésének az Orosz Föderáció területén érvényes szabályzata.
- [14] Škoda oborový podnik, Plzeň, КОМПЛЕКТ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ В-213-Ч/1, Поставочный чаш 1.1, КОПУС СВАРНОЙ, ПАСПОРТ, Škoda, 1980. (??)
- [15] *Bödök Károly*: Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére. Budapest: Corweld Kft., 1997.
- [16] *Chih-Chun, Weite Wu*: Overview of Intermetallic Sigma (σ) Phase Precipitation in Stainless Steels, *ISRN Metallurgy*, vol. 2012, 1-16. old., 2012.
- [17] Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels, ASTM A262-15, 2015

KÁDÁR CSILLA – PIERRE KUBELKA

Alumínium- és magnéziumalapú szintaktikus habok

Nyomásos infiltrálással előállított szintaktikus habok zömítési tulajdonságait és tönkremeneteli mechanizmusait vizsgáltuk. 99,6%-os tisztaságú alumínium és 99,8%-os tisztaságú magnézium mátrixanyagok és kétféle kerámia gömbhéj segítségével négyféle szintaktikus habot állítottunk elő. Az általunk vizsgált szintaktikus haboknál alumíniummátrix esetén az előállított szintaktikus habok nyomószilárdsága nem függött a felhasznált kerámia gömbhéj típusától. Alumínium helyett magnéziumot alkalmazva mátrixanyagként az egyik fajta (nagyobb átmérőjű) gömbhéjjal másfélszeres, a másik gömbhéjjal (kisebb átmérőjű) kétszeres szilárdságnövekedést lehetett elérni. A jelentős különbség valószínűleg az infiltráció során a Mg és a kisebb gömbhéj között fellépő reakciónak köszönhető, mely megváltoztatta a mátrix anyagának összetételét és ezáltal a mechanikai tulajdonságait.

1. Bevezetés

Az autóiparban és a hadiiparban különösen fontos az olyan anyagok kifejlesztése és alkalmazása, amelyek lehetővé teszik a járművek tömegének csökkentését [1]. Erre egyrészt azon EU-rendeletek miatt van szükség, amelyek előírják a különböző gépjárművek üzemanyagfogyasztásának és ezzel együtt CO₂-kibocsátásának csökkentését az üvegházhatás mérséklése miatt [2]. Másrészt – és ez különösen katonai járműveknél szempont – a jármű tömegének csökkenésével nő a manőverezhetőség.

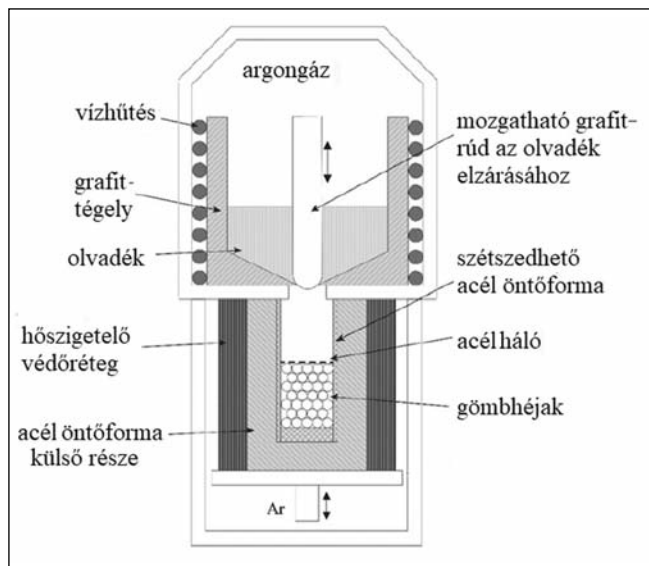
A fémmátrixú szintaktikus habok olyan speciális kompozitok, amelyeknél a fémmátrix anyagába üreges vagy porózus anyagokat, például kerámia vagy fém gömbhéjakat, duzzasztott perlitet vagy duzzasztott agyagkavicsot

raknak. Az ilyen anyagok kis sűrűségűek, jól alkalmazhatók energiaelnyelőként (pl. hadiiparban golyóálló páncélzatként [3]). Alkalmazhatóságuknak azonban jelenleg még gátat vet a magas előállítási költség és a szintaktikus habok viselkedésének hiányos ismerete. Míg egyszerű fémhabok esetén a fémhab legtöbb tulajdonsága leírható a habot alkotó fém tulajdonságának és a relatív sűrűség adott hatványának szorzatával [4], addig szintaktikus habokra ilyen összefüggés nem ismert. Habár történtek erőfeszítések egy-egy tulajdonságot befolyásoló tényezők feltárására, még számos paraméter hatása nem ismert.

Az eddig legtöbbet kutatott terület a mátrix anyagának hatása a szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságaira. Számos szerző vizsgálta az ötvözés hatását alumínium- [5–7] és magnéziummátrix [8] esetén (adott töltőanyag mellett) a zömítési tulajdonságokra. Vizsgálták a

Kádár Csilla 2007-ben szerzett PhD-fokozatot az ELTE Anyagtudomány és Szilárdtestfizika Doktori Programban. 2007-től 2019-ig az ELTE Általános Fizika Tanszékén tanársegéd, 2018-tól az MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoportban tudományos munkatárs, 2019-től a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszéken adjunktus. Kutatási területe a fémhabok és szintaktikus habok előállítása, mechanikai, szerkezeti és akusztikus emissziós vizsgálata.

Pierre Kubelka 2017-ben végzett a University of Applied Sciences of Konstanz-on. Jelenleg a Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Applied Materials intézetében doktorandusz hallgató és a Pforzheim Egyetem Materials and Material Technologies intézetében kutató. Kutatási témája alumínium- és magnéziumalapú szintaktikus habok előállítása és mechanikai tulajdonságainak meghatározása.



■ 1. ábra. A szintaktikus fémhab előállításához használt elrendezés sematikus vázlatja

gömbhéjak térfogatkitöltésének [9] és a gömbhéjak méretének [10], elrendezésének [11] a hatását is. Ugyanakkor a szintaktikus habok mechanikai tulajdonságai nemcsak a mátrix és a töltőanyag tulajdonságaitól függenek, hanem más kompozitokhoz hasonlóan a töltőanyag és a mátrix határfelületén létrejövő határreteg tulajdonságai is meghatározóak lehetnek [8, 12]. Ebben a cikkben azt vizsgáljuk, mennyire lehet elkülöníteni a mátrix és a töltőanyag hatását. Ehhez két jelentősen eltérő tulajdonságú mátrixot, és két lényegesen eltérő tulajdonságú kerámia gömbhéjből előállított szintaktikus habot vizsgálunk.

2. Felhasznált anyagok és módszerek

A vizsgálat során változtattuk mind a mátrix anyagát, mind a töltőanyagot. Mátrixanyagként 99,8%-os tisztaságú magnéziumot (a gyártó adatai alapján: 99,8 t% Mg, max. 0,05 t% Si, max. 0,05% Mn, max. 0,05 t% Fe, max. 0,05 t% Zn és max. 0,05 t% egyéb összetevő) és 99,6%-os tisztaságú alumíniumot (99,6 t% Al, 0,09 t% Si, 0,28 t% Fe, 0,02 t% Ti, és 0,01 t% egyéb összetevő) alkalmaztunk.

Töltőanyagként a Hollomet GmbH Globocer márkanévű kerámia gömbhéjait használtuk. A G1,45-tel jelölt gömbhéj átlagos külső átmérője 1,45 mm, falvastagsága ~ 250 μm volt. Ezek a gömbhéjak 33 t% Al₂O₃-ot, 48 t% amorf SiO₂-ot és 19 t% mullitot tartalmaztak. A G3,83-mal jelölt kerámia gömbhéj átlagos külső átmérője 3,83 mm, falvastagsága ~ 150 μm volt, és lényegében csak Al₂O₃-ot tartalmazott. Az 1. táblázat a felhasznált gömbhéjak jellemzőit tartalmazza.

A vizsgált szintaktikus habokat módosított nyomásos infiltrációval állítottuk elő. Az előállítás az alábbi lépésekre bontható. Egy 20 mm oldalú, négyzet alapú acél öntőformába helyeztük az ép kerámia gömbhéjakat (az esetlegesen törött gömbhéjak kiválogatása és eltávolítása után). A gömbhéjak enyhe tömörítésével (rezgetéssel) körülbelül 60-64%-os térkitöltés érhető el [13, 14]. Ezt követően a kerámia gömbhéjakat acélhálóval leszorítottuk, hogy azok az infiltrálás során ne mozdulhassanak el. Az öntőformát a gömbhéjakkal együtt magnézium esetén 750 °C-ra, alumínium esetén 600 °C-ra melegítettük, majd a 900 °C-ra hevített magnéziummal, illetve az 1000 °C-ra hevített alumíniummal 1,5 bar argon gáznyomást 5 s-ig alkalmazva infiltráltuk a kerámia gömbhéjakat. A szintaktikus habokat a berendezésben hagytuk hűlni 300 °C-ig, majd az öntőformából kivéve szobahőmérsékletig. Az 1. ábra az elrendezés elvi vázlatát mutatja.

Az elkészült fémhabszövetek felületéről eltávolítottuk a tömörebb felületi részeket (a gömbhéj sugarának megfelelő vastagságban), majd H/D = 1,5-ös átmérőviszonyú, négyzet alapú hasábokat munkáltunk ki. A négyféle szintaktikus habnál összesen 12 mintán végeztünk kváziszintaktikus nyomóvizsgálatokat egy MTS 810 típusú univerzális anyagvizsgáló géppel. A zömítéseket állandó keresztfejsébség mellett, 0,001 s⁻¹ kezdeti deformációs sebességgel hajtottuk végre 40-50%-os deformációig. A 2. táblázat tartalmazza a minták adatait. Zömítés közben digitális videokamerával rögzítettük a felületen végbemenő változásokat. Az előállított szintaktikus habok mikroszerkezeti tulajdonságait csiszolatokon vizsgáltuk Olympus PMG3 optikai mikroszkóppal és TM4000 pásztázó elektronmikroszkóppal.

1. táblázat. Az alkalmazott kerámia gömbhéjak tulajdonságai és összetétele tömegszázalékban

Jelölés	Külső átmérő (mm)	Falvastagság (μm)	Összetétel (t%)
G1,45	1,45	250	33 Al ₂ O ₃ ; 48 amorf SiO ₂ ; 19 mullit
G3,83	3,83	150	99,7 Al; 1,5 Na ₂ O; 0,05 SiO ₂ , 0,03 Mg(OH) ₂ , 0,07 egyéb oxid

2. táblázat. Az előállított szintaktikus fémhab minták adatai. Ugyanabból az öntésből készült minták esetén a cellák háttérét azonos árnyalattal láttuk el, a többi minta mind különböző öntésből készült

Elnevezés	Méret (mm)	Sűrűség (g/cm ³)	Nyomószilárdság (MPa)	Nyomószilárdság átlaga, szórása (MPa)
Mg_G1,45_1	9,5 × 9,5 × 14,25	1,48	82,2	83,4 ± 1,0
Mg_G1,45_2		1,51	83,4	
Mg_G1,45_3		1,51	84,6	
Al_G1,45_1	9,5 × 9,5 × 14,25	1,77	43,2	43,5 ± 0,7
Al_G1,45_2		1,82	44,5	
Al_G1,45_3		1,81	42,9	
Mg_G3,83_1	17,5 × 17,5 × 26,5	1,17	60,4	56,9 ± 4,2
Mg_G3,83_2		1,14	59,3	
Mg_G3,83_3		1,15	51,0	
Al_G3,83_1	17,5 × 17,5 × 26,5	1,53	42,4	42,4 ± 1,8
Al_G3,83_2		1,54	40,1	
Al_G3,83_3		1,59	44,6	

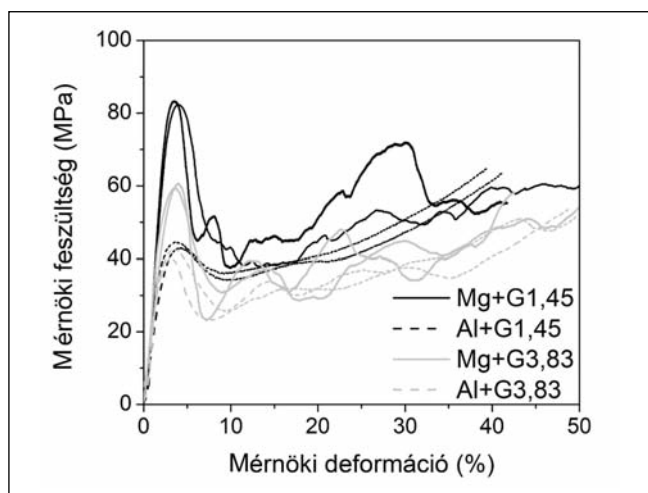
3. Eredmények és elemzésük

3.1. Mechanikai tulajdonságok

A 2. ábra a négy különböző szintaktikus fémhab jellegzetes mérnöki feszültség–mérnöki deformáció görbéjét mutatja. A mérések szórásának érzékeltetésére minden szintaktikus habtípus esetén véletlenszerűen kiválasztott két-két deformációs görbét ábrázoltunk. Az általunk vizsgált szintaktikus fémhabok deformációs görbéi a szintaktikus fémhabokra jellemző sajátosságokat mutatnak: a kezdeti kvázilineáris szakaszt követően a szintaktikus fémhabok a legtöbb esetben a feszültségben lokális maximumot mutatnak (nyomószilárdság), majd a csúcspont elérése után a mátrix anyagától és a töltőanyag tulajdonságaitól függően kisebb-nagyobb feszültségesés következik, melyet a II. szakasz követ, melyet platószakasznak hívnak [1, 15]. Ebben a második szakaszban a feszültség vagy egy közel állandó érték körül ingadozik, vagy alakítási keményedést mutat [1].

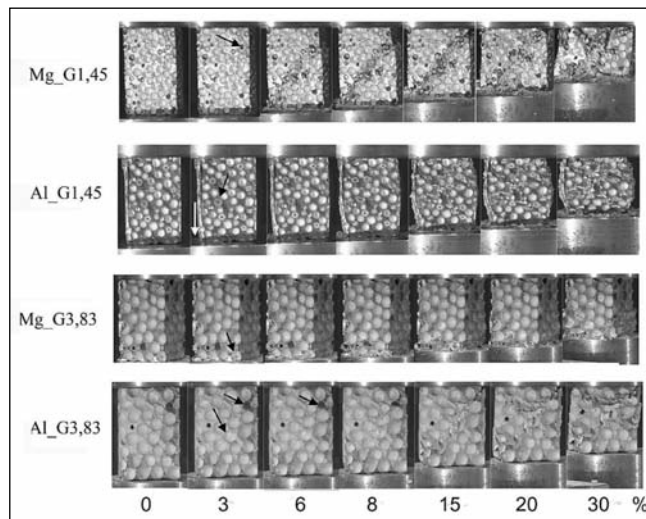
A vizsgált szintaktikus fémhabok deformációs görbéi jól reprodukálhatónak mondhatók, tekintve a gömbhéjak eltérő elhelyezkedéséből adódó szórás [16, 17]. Bár az összenyomáshoz használt minták méretei nem érték el a szabvány által ajánlott értéket (az átlagos gömbhéjméret minimum tízszerese), egyes tanulmányok arra engednek következtetni, hogy a zömítés során alkalmazott méret már elegendően nagy ahhoz, hogy a minták zömítési tulajdonságait összehasonlíthassuk [5, 18, 19]. A 2. táblázatban feltüntetett nyomószilárdság-értékek és ezek szórásai is ezt támasztják alá.

A mért nyomószilárdság-értékek azt mutatják, hogy míg alumíniummátrix esetén a különböző gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabok nyomószilárdsága közel azonos, addig magnéziummátrix esetén a kisebb átmérőjű, de vastagabb falú G1,45 gömbhéj alkalmazása a G3,83-as gömbhéj helyett 40%-os nyomószilárdság-növekedést eredményez. Azaz a gömbhéjak tulajdonságai (adott határon belül) a nyomószilárdságot csak magnéziummátrix esetén befolyásolják jelentősen, alumíniummátrix esetén ez a hatás elhanyagolható.



■ 2. ábra. Alumínium, illetve magnéziummátrixú szintaktikus fémhabok mérnöki feszültség–mérnöki deformáció görbéi különböző kerámia gömbhéjakkal

Az eltérés lehetséges okainak feltárásához megvizsgáltuk az egyes szintaktikus fémhabok szerkezetét és tönkremeneteli mechanizmusait. A 3. ábra a minta felületének változásait mutatja különböző deformációk esetén. A képek segítségével például megvizsgálhatjuk, hogy 3%-os deformáció, azaz a csúcspont kialakulásának környékén észlelhetünk-e a deformáció lokalizáltságára utaló jeleket.



■ 3. ábra. Alumínium- és magnéziummátrixú szintaktikus habok felülete különböző kerámia gömbhéjak esetén 0–30%-os mérnöki deformáció esetén.

Az Al_G3,83 (nagy átmérőjű gömbhéj alumíniummátrixban) minták esetén a nyírási sáv 3%-os deformáció esetén már látható volt; a fekete nyilak a 3. ábrán mutatják a kialakult repedéseket a kerámia gömbhéjakban, illetve a jobb felső sarokban kettévágott gömbhéj alakváltozását. Ugyanakkor 6%-nál még a gömbhéjak további törése látszik, és csak 8%-os deformációnál látszik a felületen a mátrix anyagának deformációja. Hasonló tönkremenetelről számol be *Orbulov* alumíniummátrixú, SLG mikrogömbhéjakat (Envirospheres Pty. Ltd.) tartalmazó szintaktikus fémhaboknál [20].

Az Al_G1,45 (kis átmérőjű gömbhéj alumíniummátrixban) mintáknál is látszódik a tönkremenetel kezdete 3%-os deformációnál: a minta felületén törött gömbhéjak találhatók, amelyekből kihulló por látható a minta mellett (lásd fekete nyíl). A tönkremenetel ebben az esetben majdnem a minta teljes térfogatában megy végbe, és nem lokalizálódik nyírási sáv(ok)ba. Ilyen kiterjedt tönkremenetelt írnak le pl. a [21, 22] publikációkban.

Az Mg_G3,83 (nagy átmérőjű gömbhéj magnéziummátrixban) minták tönkremenetele az Al_G3,83 mintához hasonlóan a gömbhéjak törésével kezdődik, ~ 3% deformáció környékén. A gömbhéjak törése után azonban hasonlóan viselkedik, mint egy kis sűrűségű hagyományos fémhab: az összenyomás irányára közel merőlegesen alakul ki egy deformációs sáv, amelyben a cellák összeroppannak. Ezután az összetömörödött deformációs sávval szomszédos cellasor kezd el deformálódni.

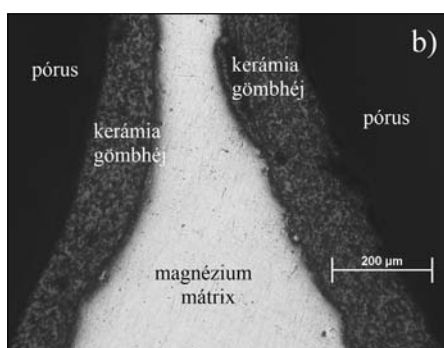
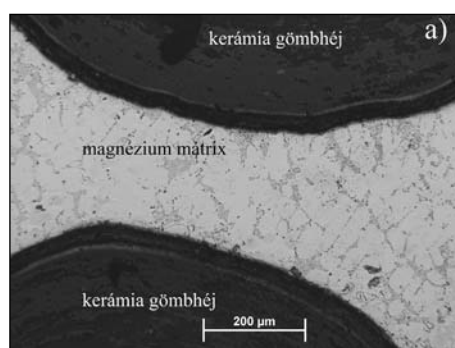
Végül az Mg_G1,45 (kis átmérőjű gömbhéj magnéziummátrixban) mintáknál 3% deformációnál a később látható nyírási sáv környezetében lévő felületen elhelyezkedő gömbök nemcsak megrepednek, hanem nagyobb darabok

ki is esnek az üregből. 6%-os deformációnál ez a nyírási sáv már jól látható; e mentén mozdul el egymáson a minta felső és alsó darabja.

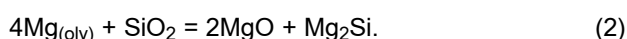
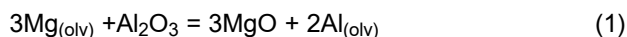
Összességében azt állapíthatjuk meg, hogy 3%-os deformáció környékén elkezdődik a kerámia gömbhéjak repedése, törése, így a feszültségesés valószínűleg a kerámia gömbhéjak töréséhez köthető. Mind alumínium-, mind magnéziummátrix esetén a mátrix képlékeny deformációja már ezt megelőzően elkezdődik mindkét gömbhéj esetén.

3.2. Szerkezeti vizsgálatok

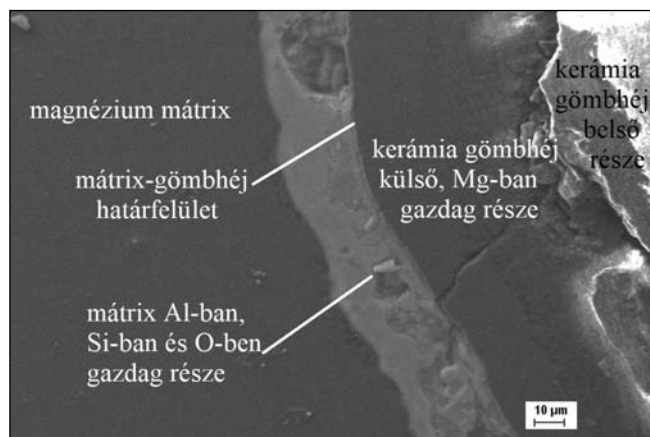
A szintaktikus fémhabokról készített felvételeken (4. ábra) látható, hogy a G1,45 jelzésű kerámia gömbhéj az előállítás során reakcióba lépett az olvadt magnéziummal. Ennek következtében mind a kerámia gömbhéj külső 30-40 µm-es részén, mind a mátrix gömbhéjjal érintkező 20-30 µm-es részén reakciók játszódtak le (5. ábra), melyek során nagy valószínűséggel az olvadt magnézium redukálta a szilícium-dioxidot és az alumínium-oxidot az alábbi reakcióegyenletek szerint [12, 23, 24]:



■ 4. ábra. a) Mg_G3,83; b) Mg_G1,45 csiszolati képe

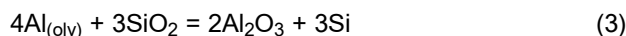


Bár az olvadt magnézium és a szilícium-dioxid között számos reakció mehet végbe, az 5. ábrán, a határfelület mentén található repedt, rideg szövetelemek arra engednek következtetni, hogy a lehetséges reakciók közül meghatározóan csak a fenti reakciók játszódnak le [12, 23].



■ 5. ábra. Mg_G1,45 mintában a mátrix-kerámia gömbhéj határfelületének elektronmikroszkópos képe. A mátrix Al-ban, Si-ban és O-ben gazdag rétegét a jobb láthatóság miatt kivilágosítottuk

A magnéziummátrixban az Mg_G1,45 esetén megtalálható az (1) reakcióegyenlet következtében keletkező $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ intermetallikus fázis, míg a Mg_G3,83 esetén a csiszolaton (4. ábra) nem látszik semmilyen intermetallikus fázis. Ennek valószínűleg az az oka, hogy míg a G1,45 kerámiagolyók vékony kerámia rétegekből állnak [25], addig a G3,83 gömbhéjak a gyártásból adódóan sokkal tömörebbek. Így a G3,83-as kerámia gömbhéjénél valószínűsíthető, hogy a reakció korlátozottan megy végbe a térfogati diffúzió miatt, míg G1,45-ös kerámia gömbhéjénél a felületi diffúzió hatására sokkal nagyobb térfogatban játszódhatnak le az (1) és (2) reakciók. Alumíniummátrix esetén az alábbi reakció játszódik le [26]:



Májlinger és Orbulov mérései alapján azonban a G1,45-ös kerámia gömbhéj és a kohóalumínium között lejátszódó reakció következtében csak a mátrix-gömbhéj határfelületénél lévő ~ 10 µm-es alumíniumréteg ötvöződik szilíciummal [26]. Méréseink alapján ez a határréteg a mi esetünkben is csak néhány µm.

4. Következtetések

Fémhátrixú szintaktikus habok nyomószilárdságát és tönkremeneteli mechanizmusait vizsgáltuk négy különböző típusú szintaktikus fémhab esetén, változtatva mind a mátrix anyagát, mind a töltőanyagot. A vizsgálatokhoz alumínium-, valamint magnéziummátrixot és két, különböző nagy-

ságú és összetételű kerámia gömbhéjából előállított szintaktikus fémhabot használtunk. Az előállított habok mindegyike rendelkezett 3% körüli alakváltozásnál úgynevezett csúcsfeszültséggel, amely után feszültségesést tapasztaltunk az $\text{Al}_G1,45$ -ös mintákat leszámítva, ahol ez a feszültségesés elhanyagolható volt. Ebben az esetben a minta deformációja majdnem a minta teljes térfogatára kiterjedt. A többi esetben a feszültségesés után a felületen nyírási sáv jelent meg. A kialakult nyírási sáv irányát befolyásolta mind a gömbhéj geometriája, mind a mátrix anyaga: nagy átmérőjű, vékony falú gömbhéj és magnéziummátrix esetén ez a sáv közel vízszintes volt, a többi esetben közel 45°-os.

Alumíniummátrix esetén az előállított szintaktikus habok nyomószilárdsága nem függött a felhasznált kerámia gömbhéj típusától. Alumínium helyett magnéziumot alkalmazva mátrixanyagként, a G3,83 gömbhéjjal másfélszeres, a másik G1,45 gömbhéjjal kétszeres szilárdságnövekedést lehetett elérni. A jelentős szilárdságkülönbség valószínűleg annak köszönhető, hogy a szilícium-dioxidot tartalmazó gömbhéj esetén az olvadt magnézium és a gömbhéjban található oxidok közötti reakció a felületi diffúzió miatt jóval nagyobb térfogatban játszódott le, mint a tömörebb, csak alumínium-oxidot tartalmazó gömbhéj esetén. Ezáltal az „erősítő” hatás egy része a mátrixanyag ötvöződésének köszönhető.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben leírt kutatás a European Regional Development Fund (EFRE), a Baden-Württemberg állam Ministry of Science, Research and the Arts (MWK) keretein belül működő ZAFH InSeL kutatási program (no. 32-7545.24-20/6/3) és a TÉT (2019-2.1.11-TÉT-2019-12 00058) támogatásával jött létre.

Irodalom

- [1] Gupta, N., Luong, D. D., Cho, K.: Magnesium Matrix Composite Foams—Density, Mechanical Properties, and Applications. *Metals* 2012, 2, 238–252. <https://doi.org/10.3390/met2030238>
- [2] https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/regulation_hu
- [3] Marx, J., Portanova, M., Rabiei, A.: Performance of Composite Metal Foam Armors against Various Threat Sizes. *J. Compos. Sci.* 2020, 4, 176. <https://doi.org/10.3390/jcs4040176>
- [4] Michael F. Ashby, Tony Evans, NA Fleck, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, L. J. Gibson: *Metal Foams: A Design Guide*, 2000, Butterworth – Heinemann, Boston
- [5] Kubelka P., Matz A. M., Jost N.: (2020) Compression Behavior of Low-Pressure Cast AMC Syntactic Foams with High Porosity. In: Dukhan N. (eds) Proceedings of the 11th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams (MetFoam 2019). The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42798-6_11
- [6] R. A. Palmer, K. Gao, T. M. Doan, L. Green, G. Cavallaro: Pressure infiltrated syntactic foams—Process development and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 464, 2007, Pages 85–92, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.116>.
- [7] I. N. Orbulov, J. Ginzlter: Compressive characteristics of metal matrix syntactic foams, *Compos. Part 16 A: Appl. S.* 43 (2012) 553–561. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.008>
- [8] M. Hartmann, K. Reindel, R. F. Singer: Fabrication and Properties of Syntactic Magnesium Foams, 18 MRS Proceedings 521 (1998) 211. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-211>
- [9] P. K. Rohatgi, J. K. Kim, N. Gupta, Simon Alaraj, A. Daoud: Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 37, Issue 3, 2006, Pages 430–437, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.047>.
- [10] M. Kiser, M. Y. He, F. W. Zok: The mechanical response of ceramic microballoon reinforced aluminum matrix composites under compressive loading, *Acta Materialia*, Volume 47, Issue 9, 1999, Pages 2685–2694, [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00129-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00129-9).
- [11] M. Hartmann, I. Crössmann, K. Reindel, R. F. Singer: Microstructure and Mechanical Properties of Cellular Magnesium Matrix Composites, In: J. Banhart, M.F. Ashby, N.A. Fleck: *Metal Foams and Porous Metal Structures*. MIT Verlag, 1999
- [12] Pierre Kubelka, Csilla Kádár, Norbert Jost: Effect of the interface on the compressive properties of magnesium syntactic foams, *Materials Letters*, Volume 287, 2021, 129293, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129293>.
- [13] D. Sebők, C. Wiener, Á. Kukovecz: Szintaktikus fémhabok deformációja során fellépő szerkezeti változások
- [14] Katona Bálint, Orbulov Imre Norbert: Kerémiagömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok kvázisztatikus és nagy alakváltozási sebességű vizsgálata. *BKL Kohászat*, 149. évf 3. szám, 2016
- [15] A. Santa Maria, B. F. Schultz, J. B. Ferguson, P. K. Rohatgi: 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*, Volume 582, 2013, Pages 415–422, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.081>.
- [16] Imre Norbert Orbulov, Attila Szlancsik, Alexandra Kemény, Domonkos Kincses: Compressive mechanical properties of low-cost, aluminium matrix syntactic foams, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 135, 2020, 105923, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105923>.
- [17] Katona Bálint, Szabó Gábor, Orbulov Imre Norbert: Fémhátrix szintaktikus fémhabok fáradási tulajdonságai, *BKL Kohászat*, 148. évf 2. szám, 2015
- [18] Yue Zhang, Tao Jin, Shiqiang Li, Dong Ruan, Zhihua Wang, Guoxing Lu: Sample size effect on the mechanical behavior of aluminum foam, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 151, 2019, Pages 622–638, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.019>.
- [19] Kádár C., Máthis K., Chmelik F., Knappek M., Orbulov I. N.: (2020) The Deformation of Expanded Clay Syntactic Foams During Compression Characterized by Acoustic Emission. In: Dukhan N. (eds) Proceedings of the 11th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams (MetFoam 2019). The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42798-6_10
- [20] Imre Norbert Orbulov: Compressive properties of aluminium matrix syntactic foams, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 555, 2012, Pages 52–56, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.032>.
- [21] Dorian K. Balch, John G. O'Dwyer, Graham R. Davis, Carl M. Cady, George T. Gray, David C. Dunand: Plasticity and damage in aluminum syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 391, Issues 1–2, 2005, Pages 408–417., <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.012>.
- [22] G. H. Wu, Z. Y. Dou, D. L. Sun, L. T. Jiang, B. S. Ding, B. F. He: Compression behaviors of cenosphere–pure aluminum syntactic foams, *Scripta Materialia*, Volume 56, Issue 3, 2007, Pages 221–224., <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.10.008>.
- [23] Johnson, P. K., Fazal-Ur-Rehman, Fox, S., Flower, H. M., and West, D. R. F.: Interface reactions in the Al–Si–SiC and Mg–Al–Al₂O₃ composite systems. Switzerland: N. p., 1995. Web.
- [24] Fazal-Ur-Rehman, Fox, S., Flower, H. M. et al.: Fibre/matrix interactions in magnesium-based composites containing alumina fibres. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* 29, 1636–1645 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF00368938>
- [25] Kádár, C., Máthis, K., Knappek, M., Chmelik, F.: The Effect of Matrix Composition on the Deformation and Failure Mechanisms in Metal Matrix Syntactic Foams during Compression. *Materials* 2017, 10, 196. <https://doi.org/10.3390/ma10020196>
- [26] Kornél Májlínger, Imre Norbert Orbulov: Characteristic compressive properties of hybrid metal matrix syntactic foams, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 606, 2014, Pages 248–256, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.100>.