

SZINTAKTIKUS FÉM HABOK KEMÉNYSÉGMÉRÉSE

HARDNESS MEASUREMENT OF METAL MATRIX SYNTACTIC FOAMS

Orbulov Imre

Kulcsszavak: fémmátrixú kompozit, fémhab, szintaktikus hab, kerámia mikrogömbhéj, keménységmérés
Keywords: metal matrix composite, metallic foams, syntactic foams, ceramic microballoon, hardness testing

Összefoglalás

Három különböző mikrogömbhéjtípus felhasználásával speciális kompozitokat, Al99,5 és AlSi12 mátrixú szintaktikus fémhabokat állítottunk elő nyomásos infiltrálással. A kísérleteink során megmértük a szintaktikus fémhabok Brinell-keménységét, valamint dinamikus keménységét. Megfigyeltük, hogy a mikrogömbhéjak beépítése nyomán a Brinell-keménység az Al99,5 mátrix esetén növekedett, míg AlSi12 mátrix esetén csökkent a befogadó anyaghoz képest. A legnagyobb Brinell-keménységet az SL150 mikrogömbhéjak beépítése során mértük a szintaktikus habokban, mivel ezek rendelkeztek a legnagyobb fajlagos felülettel és így egy adott terhelési szinten ezekben a gömbhéjakban ébredt a legkisebb feszültség. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a Brinell-keménység a szintaktikus habok sűrűsége alapján megbecsülhető. A dinamikus keménységmérések során megfigyeltük, hogy a szintaktikus habok keménysége nőtt az alapanyag keménységéhez képest mind az Al99,5, mind pedig az AlSi12 mátrix esetében. A legnagyobb keménységet ismét az SL150 típusú gömbhéjakat tartalmazó habok mutatták. Kimutattuk, hogy a mátrixanyagok között megjelent keménység (mind a Brinell, mind pedig a dinamikus) különbség a mikrogömbhéjak beépítése folytán csökkent, ami arra utal, hogy a mátrix keménységre gyakorolt hatása kicsi.

Abstract

Three different types of ceramic microballoons were applied to produce syntactic foams with Al99.5 and AlSi12 matrix by pressure infiltration. We measured the Brinell and dynamic hardness of the syntactic foams. The Brinell hardness was increased in the case of Al99.5 matrix and decreased in the case of AlSi12 matrix. The highest hardness was ensured by SL150 type microballoons, because they had the largest specific surface area and therefore the stress was the smallest on them at a given load level.

Orbulov Imre okleveles gépészmérnök, jelenleg végzős PhD-hallgató a BME, Anyagtudomány és Technológia Tanszéken. E-mail címe: orbulov@gmail.com

We show that Brinell hardness could be estimated from density if the constituents of the foams are known. The dynamic hardness increased due to microballoon incorporation in all cases. The highest dynamic hardness was produced by SL150 microballoon incorporation. We showed that, the original dynamic hardness difference between Al99.5 and AlSi12 matrices was decreased due to microballoon incorporation. Therefore the effect of matrix material on the hardness of the foams is small.

1. Bevezetés

A fémmátrixú kompozitok a mérnöki gyakorlatban egyre elfogadottabb és egyre gyakrabban alkalmazott anyagféleségek. Speciális alkalmazási területeik azok az eszközök, amelyek súrlódásnak, kopásnak vannak kitéve. Kiszűrő B4C erősítésű (10 térfogat-%) Al₄,5Cu kompozitok tribológiáját vizsgálta, amelyek 3 tf% szilárd MoS₂ kenőanyagot is tartalmaztak és megállapította, hogy megfelelő kenéssel a súrlódás a felére csökkenthető és ekkor a beépített MoS₂ kenőanyag hatása elhanyagolható [1]. Speciális technikák segítségével (lézeres porinjektálás [2], amorf fémszalagok gyorsított eljárása [3, 4]) is állítottak elő kompozitokat, amelyekbe kopásálló részecskéket ágyaztak. A fentiekén kívül a változatos fémmátrixú kompozitok dupla kompozitként is előfordulhatnak [5] és technológiai vizsgálataik (hegesztés) is megkezdődtek [6].

Napjainkban a fémmátrixú kompozitok egy speciális csoportja, a fémmátrixú szintaktikus habok is egyre fontosabb szerepet játszanak különféle repüléstechnikai, járműtechnikai ipari alkalmazásokban. A fémmátrixú szintaktikus habokban a porozitást a könnyűfém mátrixanyagba tervszerűen beépített kerámia mikrogömbhéjakkal biztosítják. A leggyakoribb gyártási módszerek a nyomásos infiltrálás és a keveréses eljárás. Mindkét eljárásban jelentős szerepe van a mátrix és erősítőanyag közötti határfelületnek, amely kritériumaival Kaptay behatóan foglalkozott [7, 8]. Ennek kapcsán vizsgálatok tárgyát képezték az erősítőanyagra felvihető különböző bevonatok is [9, 10]. 1998-ban Rohatgi gyártott nyomásos infiltrálással mikrogömbhéjakat is tartalmazó szállóhamu („fly ash”) alkalmazá-

sával szintaktikus fémhabokat. Vizsgálatai során megállapította, hogy az így előállított kompozitok nyomószilárdsága a mikrogömbhéjak térfogathányadának növelésével nőtt [11, 12]. Balch az „E-spheres” márkanevű gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabokat gyártott nyomásos infiltrálással. A mikrogömbhéjak térkitöltését igyekezett maximalizálni, és munkája során a szintaktikus habok nyomás hatására történő tönkremenetelét tanulmányozta [13, 14]. Ugyanakkor 2007-ben Palmer már a nyomásos infiltrálással készített szintaktikus fémhabok széleskörű vizsgálatáról (húzás, hajlítás, nyomás) számolt be [15]. Détári 1999-ben szintén nyomásos infiltrálással előállított szintaktikus fémhabok terhelhetőségével foglalkozott [16].

Ramachandra és Radhakrishna 2005-ben sikeresen demonstrálták a keveréses eljárás létjogosultságát is. Az eljárás előnyeként emelték ki a tág határok között változtatható térkitöltést. Az eljárás legfőbb hátránya a mikrogömbhéjak egyenlőtlen eloszlása (a mikrogömbhéjak és a mátrixanyag sűrűségkülönbsége miatt), illetve, hogy a keverés során a mikrogömbhéjak töredezhetnek [17].

A szintaktikus fémhabok mátrixanyaga leggyakrabban valamilyen könnyűfém ötvözet. A keménységük és kopásállóságuk általában nem megfelelő, ezért gyakran szilárdságnövelő eljárás segítségével növelik a keménységet. Az alkalmazások szempontjából fontos kopásállóság növelhető kerámiarészecskék (például SiC, B₄C, Al₂O₃ stb.) beépítésével. Ezzel a kérdéskörrel foglalkozott és a kopásállóságot vizsgálta Ramachandra és Radhakrishna 2005-ben és 2007-ben [17, 18]. Megállapították, hogy a kopásállóság a beépített, főleg SiO₂- és Al₂O₃-tartalmú kerámia gömbhéjak térkitöltésének növelésével nőtt. A koptatási kísérletek során egy tűskeszerű próbatestet nyomtak egy forgó tárcsához („pin-on-disc” eljárás), és megállapították, hogy kis terhelés és sebesség esetén (~5 N és ~47 m/min) a meghatározó kopási forma az abrazív kopás volt. Nagyobb terhelés és sebesség esetén a kopási mód eltolódott a delamináció és oxidáció irányába. A szakirodalmat tovább tanulmányozva és összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a szintaktikus fémhabok jó energiaelnyelő képességgel rendelkeznek, jó a mechanikai csillapítóképességük, kicsi a sűrűségük, kiválóak a fajlagos tulajdonságaik és a sérüléseiket képesek egy helyre koncentrálni, ezért sok, más-más területen jelentkező sérülést is el tudnak viselni. Gyakran alkalmazzák őket energiaelnyelőkként, zajcsillapítóként, mélytengeri járművek (tengeralattjárók) és repüléstechnikai eszközök burkolatrendszerének elemeként. A hazai kutatók is számos eredményt közöltek az elmúlt években az alkalmazási lehe-

tőségekről [20, 21, 22]. A fenti példák kapcsán a keménységük és annak változása feltétlenül vizsgálatra érdemes tulajdonság, és ennek a munkának a célja éppen a fémhabok keménységméréssel való jellemezhetőségének értékelése volt.

2. A felhasznált és az előállított anyagok

A szintaktikus fémhabokat Al99,5 vagy AlSi12 mátrixszal állítottuk elő. Az Al99,5 lágy, keménysége és kopásállósága kicsi. Alkalmazását a szakirodalomban ismertett mérésekben általános elterjedtsége indokolja. Az AlSi12 lényegesen keményebb, és jobb a kopásállósága is a Si-tartalma miatt. Alkalmazásának fő indoka a jó önthetősége és híg folyóssága olvadt állapotban, ami megkönnyíti a szintaktikus fémhabok gyártását. A beépítésre kerülő mikrogömbhéjakat az Envirospheres Pty. Ltd. gyártotta „E-spheres” márkaneven. Három különböző mikrogömbhéjtípust (SL150, SLG és SL300) alkalmaztunk. A mikrogömbhéjak anyagának kémiai összetételét az 1. táblázat, geometriai jellemzőiket a 2. táblázat mutatja. Mint látható a mikrogömbhéjak közötti fő különbség az átlagos átmérőjükben, falvastagságukban és valódi sűrűségükben jelentkezett. (A valódi sűrűség (true density) az Archimedes törvénye alapján meghatározott sűrűség. Gömbhéjak esetén a körülrész térrész (belső gömb) térfogata is számításba van véve, de a gömbhéjak közötti rész nem.)

1. táblázat – Az E-spheres mikrogömbhéjak jellemző összetétele

Összetevő	Tömeg%
Al ₂ O ₃	36-40
SiO ₂	55-60
TiO ₂	1,4-1,6
Fe ₂ O ₃	0,4-0,5
Más oxidok	Maradék

2. táblázat – Az E-spheres mikrogömbhéjak tipikus tulajdonságai

Típus	Átlagos külső átmérő μm	Átlagos falvastagság μm	Fajlagos felület μm ⁻¹
SL150	100	3,69	0,060
SLG	130	5,35	0,046
SL300	150	6,75	0,040

Munkánk során hatféle szintaktikus fémhabot állítottunk elő. A mikrogömbhéjak térkitöltése minden esetben 64 tf% volt. A tömböket öntőformában, nyomásos infiltrálással gyártottuk, az infiltrálási nyomás ~0,4 MPa (~4 bar) volt, amelyet Ar gázzal biztosítottunk. Az infiltrálási hőmérséklet

~600 °C volt az AISi12 mátrix és ~710 °C volt az Al99,5 mátrix esetén. Az olvadáknak a kerámia gömbhéjak közé való beitatódását biztosító gázyomást 30 s-ig tartottuk fenn, majd a kemence nyitásával levegőn lehűtött tömbökből (1. ábra) 35x55 mm keresztmetszetű próbatesteket munkáltunk ki (2. és 3. ábra). A próbatesteket az összetevőikről neveztük el, például az AISi12-SL300 jel olyan próbatestet jelöl, amely mátrixa AISi12 alumínium volt, és ~64 tf% SL300 típusú mikrogömbhéjat tartalmazott. Minden próbatestet a BME-ATT Fémmátrixú kompozitok Laboratóriumában készítettünk (4. ábra).



1. ábra – Fémmátrixú szintaktikushab tömbök
Fig. 1 – Metal matrix syntactic foam blocks



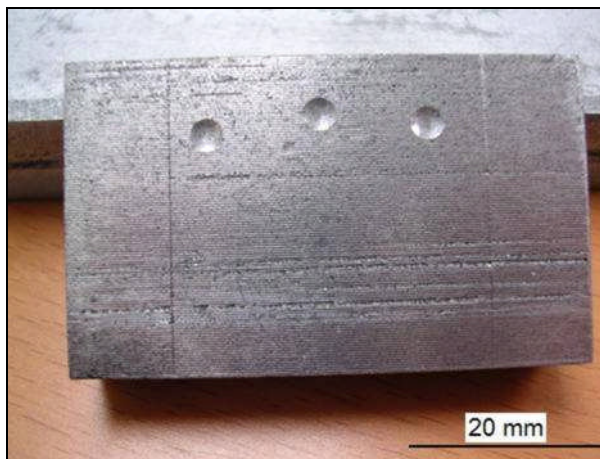
2. ábra – AISi-SL150 fémmátrixú szintaktikushab tömb és a belőle levágott próbatestek
Fig. 2 – An AISi-SL150 type metal matrix syntactic foam block and sliced samples:

3. A keménységmérési módszerek

A keménységméréseket a tiszta, töltőanyagot nem tartalmazó mátrixanyagokon és a szintaktikus fémhabokon is elvégeztük.

A keménység mérésére a minél nagyobb terület lefedése és a minél jobb átlagolás végett Brinell-eljárást alkalmaztunk, amelyet egy VPM HPO 13/6062 típusú keménységmérő segítségével végeztünk el (5. ábra). A mérés során 10 mm átmérőjű acél golyót alkalmaztunk, mivel ezzel tudtuk az átlagolás szempontjából fontos,

legnagyobb lenyomatátmérőt biztosítani. A terhelőerő ~1840 N (187,5 kp) volt az Al99,5 és ~2450 N (250 kp) az AISi12 mátrix esetében. A terhelést 10 s-ig tartottuk fent, és minden próbatesten három-három mérést végeztünk. A lenyomatok átmérőjét kétszer, egymásra merőlegesen mértük meg.



3. ábra – Al99,5-SLG próbatest Brinell-nyomatokkal
Fig. 3 – The specimens with Brinell-imprints



4. ábra – A BME ATT Fémmátrixú Kompozitok Laboratóriuma
Fig. 4 – Metal Matrix Composite Laboratory at BME DMSE



5. ábra - VPM HPO 13/6062 típusú keménységmérő
Fig. 5 - VPM HPO 13/6062 type hardness tester

A dinamikus keménységméréseket egy Equotip típusú készülékkel végeztük (6. ábra). A készülék megfelel az ASTM 956-96 előírásainak. Az eljárás során a készülék egy félgömbfejű lövedéket lő a próbatestre és megméri a sebességét a becsapódás előtt és a próbatestről visszapatpanva is a próbatesttől 1 – 1 mm-re. E két jellemző sebesség segítségével határozza meg a dinamikus keménységet. Minden próbatesten 10-10 mérést végeztünk és azok eredményeit átlagoltuk.



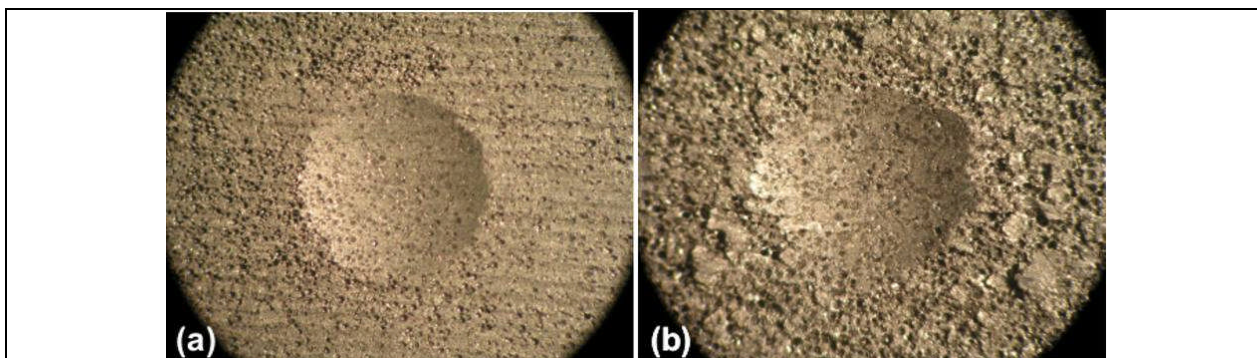
6. ábra – Equotip típusú dinamikus keménységmérő

Fig. 6 – Equotip type dynamic hardness tester

4. A mérési eredmények és azok értékelése

A 7. ábra két tipikus Brinell-lenyomatot mutat. Megfigyelhető, hogy az SL150 mikrogömbhéjak esetében a lenyomat pereme éles és határozott. Az SL300 mikrogömbhéjak esetében (véltetően a nagyobb átlagos gömbhéj átmérő miatt) viszont a határvonal elmosódott. A mért keménységértékeket a 8. ábra mutatja a mikrogömbhéjtípus függő-

vényében. A mátrixanyagok keménységét az összehasonlíthatóság kedvéért szintén ábrázoltuk. Az Al99,5 mátrix esetében a kerámia mikrogömbhéjak beépítésével a keménység nőtt az alapanyag keménységéhez képest, ami azt jelenti, hogy a mátrixanyag hamarabb kezdett deformálódni, mint ahogy a mikrogömbhéjak törni kezdtek, a keménység növekedett. A legnagyobb növekedés az SL150 mikrogömbhéjak esetében mutatkozott. Ezeknek a gömbhéjaknak a legkisebb az átmérője, és ezért a legnagyobb fajlagos felülettel rendelkeznek. Ebben az esetben ébred a gömbhéjakban a legkisebb feszültség adott terhelési szinten. A fentiek értelmében az SL150 gömbhéjaknak erősebbeknek kell lenniük, mint a nagyobbaknak, és később indulnak törésnek. Ezt megerősíti a 8. ábra diagramja is, amely folyamatosan csökkenő keménységet mutat a mikrogömbhéjak átlagos átmérőjének növekedésével. A nagyobb átlagos átmérőjű mikrogömbhéjak esetén a feszültség nagyobb volt, és a mikrogömbhéjak hamarabb kezdtek törni. Az AlSi12 mátrixanyag esetében a mikrogömbhéjak beépítésével a keménység jelentősen csökkent, mert a mikrogömbhéjak hamarabb kezdtek törni, mint ahogy a mátrixanyag képlékeny alakváltozása megindult volna. Ennek következtében a szintaktikus fémhabok szilárdsága és keménysége csökkent. Újra az SL150 típusú gömbhéjak biztosították a szintaktikus fémhabok közül a legnagyobb keménységet, és a keménység a mikrogömbhéjak átlagos átmérőjének növelésével fokozatosan csökkent. Ezek után megvizsgáltuk a kapcsolatot a sűrűség és a keménység között annak érdekében, hogy megállapítsuk, lehet-e következtetni egy egyszerű sűrűségmérésből a szintaktikus fémhabok várható keménységére.

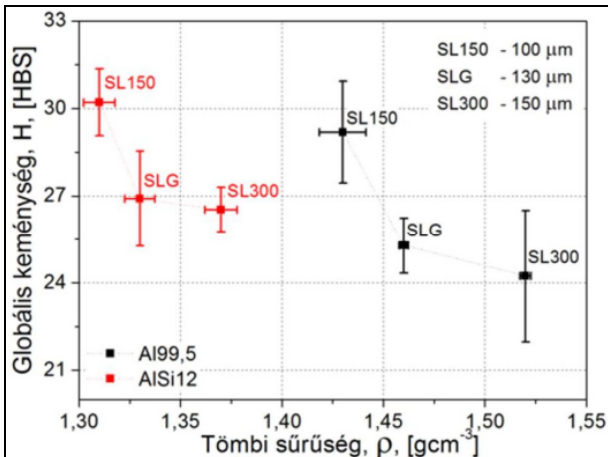


7. ábra – Brinell-lenyomat makrofotója Al99,5-SL150 (a) és Al99,5-SL300 (b) próbatest felületén
Fig. 7 – A typical Brinell-imprint on the surface of Al99.5-AL150 type (a) and Al99.5-SL300 type (b) foam sample

A kapcsolatot a 9. ábra mutatja. Habár a keménységek egymással átfedést mutattak, a várható keménységsáv a sűrűségből egy egyszerű mestergörbe felvétele után megbecsülhető. A diagram azt is mutatja, hogy a mikrogömbhéjak

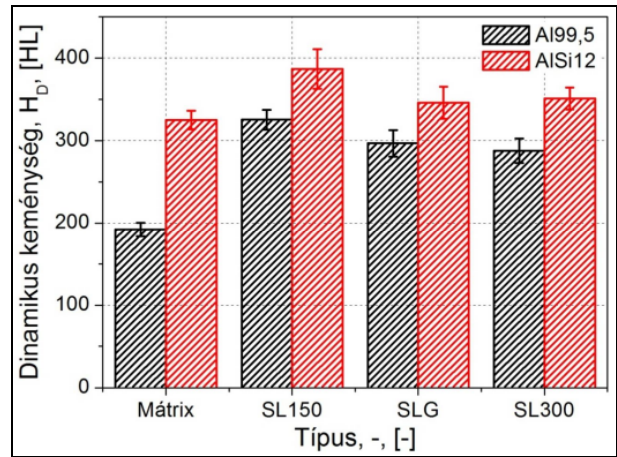
átmérőjének növekedésével nem csak a mért keménység csökkent, hanem a sűrűség is nőtt. Megfigyelhető, hogy az SLG és SL150 típusok esetében a keménységek közelebb estek egymáshoz, mivel a fajlagos felületük is közelebb

esett egymáshoz, mint az SL150 mikrogömbhéjakéhoz. Érdekes lehetőség megvizsgálni, hogy a Brinell-keménységmérés milyen mértékben hatott az anyag szerkezetére a felszín alatt. Ennek érdekében a lenyomatokat is átszelő metszeteket készítettünk és optikai mikroszkópi felvételeket készítettünk. Egy ilyen felvételt mutat

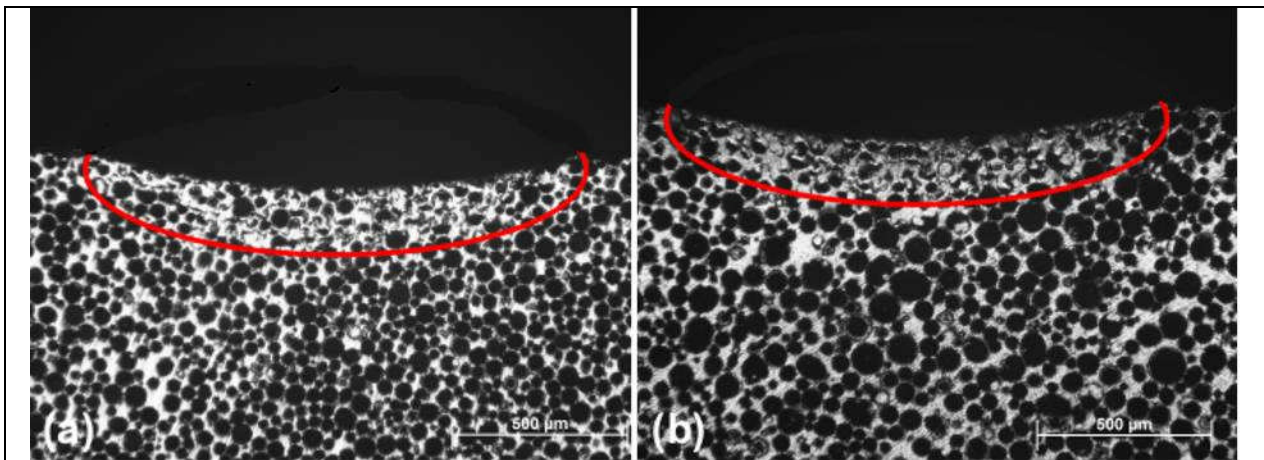


9. ábra – Kapcsolat a szintaktikus fémhabok Brinell-keménysége és a sűrűsége között
Fig. 9 – Connection between global hardness and density:

a 10. ábra. A felvételen megfigyelhető, hogy a keménységmérés befolyással van a mikroszerkezetre kb. 1 mm mélyen a lenyomat alatt. Ebben a rétegben a mikrogömbhéjak összetörték. Jól megfigyelhető, hogy a sérült zóna csak a terhelés irányában terjedt, oldalirányban a gömbhéjak épek maradtak.



11. ábra – A szintaktikus habok dinamikus keménysége
Fig. 11 – Dynamic hardness of the syntactic foams:



10. ábra – A Brinell-lenyomatok keresztmetszete: Al99,5-SL150 (a) és Al99,5-SLG (b)
Fig. 10 – Cross-section of a Brinell imprint for Al99,5-SL150 (a) and Al99,5-SLG (b) type foam

A dinamikus keménységmérések során azt tapasztaltuk (11. ábra), hogy az AlSi12 mátrix dinamikus keménysége duplája az Al99,5 mátrix-anyagának. Hasonlóan a habok esetében is az AlSi12 mátrixú szintaktikus habok dinamikus keménysége bizonyult nagyobbak, de a különböző mátrixanyagú habok közötti dinamikus keménységkülönbség sokkal kisebb volt, mint a mátrixanyagok esetében, ami azt mutatja, hogy a kompozitokban a mátrixanyag hatása a dinamikus keménységre kicsi. A mérések során (a Brinell-keménységhez hasonlóan) újra az SL150 típusú mikrogömbhéjak biztosították a legnagyobb keménységet. A mikrogömbhéjak átmérőjének

növekedésével és a fajlagos felületük csökkenésével a dinamikus keménység csökkent. Ennek oka az lehet, hogy a kisebb mikrogömbhéjak egységnyi térfogatban nagyobb mennyiségben fordulnak elő, mint a nagyobb mikrogömbhéjak. Az átmérő növekedésével a dinamikus keménység előbb kis mértékben csökkent, majd gyakorlatilag szórásértéken belül változott. Ezt azzal lehet magyarázni, hogy a 100 – 130 – 150 μm sorozatban az utóbbi kettő egymáshoz közelebb esik, így a tulajdonságaikban is jobban hasonlítanak egymáshoz, és így kisebb a különbség az SLG és SL300-as gömbhéjak között, mint az SL150 és SLG (SL300) között.

5. Következtetések

Az előállított szintaktikus fémhabok keménységmérési vizsgálatának eredményei alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- Az Al99,5 mátrixú szintaktikus fémhabok esetén a mikrogömbhéjak beépítése növelte a szintaktikus habok globális keménységét. A legnagyobb növekedést az SL150 típusú mikrogömbhéjak biztosították. A magyarázat a nagy fajlagos felületük, amely adott terhelési szint mellett a mikrogömbhéjakban kisebb feszültséget eredményezett, és így a mikrogömbhéjak később indultak törésnek.
- Az AlSi12 mátrixú szintaktikus fémhabok esetén az mátrix bizonyult a legkeményebbnek. A terhelés rugalmas úton adódott át a mikrogömbhéjakra, és azok törni kezdtek, a mátrix képlékeny alakváltozása csak ezután indult meg. A szintaktikus fémhabok „lágyabbnak”, kevésbé keménynek bizonyultak.
- Az SL150 típusú mikrogömbhéjaknak van a legnagyobb fajlagos felülete, és ezért bennük ébredt a legkisebb feszültség adott terhelési szinten. A törési feszültség – és így a keménység – csökkent a mikrogömbhéjak átlagos átmérőjének növelésével és a fajlagos felület csökkenésével.
- Megállapítottuk, hogy egy adott anyagpárosítás esetén a mestergörbe ismeretében a szintaktikus fémhabok keménysége sűrűségük ismeretében egyszerűen megbecsülhető.
- A mikrogömbhéjak beépítése a dinamikus keménység növekedését eredményezi. A mátrixanyag típusa kis befolyással van a dinamikus keménységre, vagyis a különböző mátrixanyagú szintaktikus habok közötti dinamikus keménységkülönbség kisebb, mint a mátrixanyagok között. A legnagyobb dinamikus keménységet az SL150 típusú gömbhéjak biztosították.

Köszönetnyilvánítás

A Fém mátrixú Kompozitok Laboratóriumot a GVOP a 3.2.1-2004-04-0145/3.0 szerződéssel támogatta. A kísérleteket a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal az NKTH-OTKA K69122 szerződés keretében támogatta. Külön köszönet Tóth Róbertnek és a C. H. Erbslöh Hungária Kft-nek a mikrogömbhéjak biztosításáért. Köszönet illeti a Corweld Kft.-t is az Equotip típusú keménységmérőgép biztosításáért.

Hivatkozások

- [1] Kislinder E.: Alumínium kompozit tribológiai vizsgálta. Gép, 50 (1998) 11, 36-40.
- [2] Janó V, Buza G, Kálazi Z: Acél mátrixú Al₂O₃ kerámia kompozit rétegek létrehozása lézeres porinjektálás segítségével. Gép, 57 (2006) 7, 19-23.
- [3] Szigeti F, Bárczy P: Amorf fémmátrixú kompozit anyagok gyártása és tulajdonságainak vizsgálata. Bányászati és kohászati lapok Kohászat, 130 (1997) 2-3, 89-96.
- [4] Szigeti F, Bárczy P, Lovas A: Amorf fémmátrixú kompozitok előállítása és abrazív tulajdonságaik vizsgálata. Gép, 50 (1998) 9, 23-27.
- [5] Blücher JT, Dobránszky J: Kompozithuzallal erősített alumínium duplakompozit szerkezetek. Bányászati és kohászati lapok Kohászat, 136 (2003) 5, 213-217.
- [6] Brenner A, Blucher JT, Eager T W: A metal mátrixu kompozitok hegeszthetősége: A 6061/Al₂O₃ ponthegeztési technológiája. Gép, 46 (1994) 1, 16-22.
- [7] Kaptay Gy: Kerámiával erősített fémmátrixú kompozitok gyártásának határfelületi vonatkozásai. Bányászati és kohászati lapok. Kohászat, 130 (1997) 5-6, 201-208.
- [8] Kaptay Gy: Kerámiával erősített fémmátrixú kompozitok gyártásának határfelületi vonatkozásai: II. Határfelületi kritériumok meghatározása preformába öntött MMC-k gyártásának biztosítására. Bányászati és kohászati lapok Kohászat 130 (1997) 8-9, 311-314.
- [9] Tomolya K: Al-SiC kompozitok fejlesztése SiC rézzel történő bevonásával. Bányászati és kohászati lapok Kohászat, 140 (2007) 6, 39-42.
- [10] Baumli P, Sytchev J, Kaptay Gy. SiC és Al₂O₃ kerámia szemcsék felületkezelése sóolvadékban, kompozitok fejlesztése céljából. Bányászati és kohászati lapok Kohászat, 139 (2006) 3, 47-50.
- [11] Rohatgi PK, Guo RQ, Iksan H, Borchelt EJ, Asthana R: Pressure infiltration technique for synthesis of aluminium – fly ash particulate composite. Mater. Sci. Eng. A, 244 (1998) 22-30.
- [12] Rohatgi PK, Kim JK, Gupta N, Alaraj S, Daoud A: Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration

- technique. Composites Part A: Appl. Sci. and Manuf. 37 (2006) 430-437.
- [13] Balch DK, Dunand DC: Load partitioning in aluminium syntactic foams containing ceramic microspheres. Acta Mater. 54, 1501-1511.
- [14] Balch DK, O'Dwyer JG, Davis GR, Cady CM, Gray GT, Dunand, DC: Plasticity and damage in aluminium syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions. Mater. Sci. Eng. A. 391 (2005) 408-417.
- [15] Palmer RA, Gao K, Doan TM, Green L, Cavallaro G: Pressure infiltrated syntactic foams – Process development and mechanical properties. Mat. Sci. Eng. A. (2005) 464, 85-92.
- [16] Détári P, Degischer H-P: Üreges kerámia részecskékkel erősített alumínium mátrixú kompozit terhelhetőségének vizsgálata zömítéssel. Anyagvizsgálók lapja, 9 (1999) 3, 114-116.
- [17] Ramachandra M, Radhakrishna K: Synthesis – microstructure – mechanical properties – wear and corrosion behaviour of an Al-Si (12%) – fly ash metal matrix composite. J. Mater. Sci. 40 (2005) 5989-5997.
- [18] Ramachandra M, Radhakrishna K: Effect of reinforcement of flyash on sliding wear, slurry erosive wear and corrosive behaviour of aluminium matrix composite. Wear. 262 (2007) 1450-1462.
- [19] Orbulov IN, Kientzl I, Németh Á: Fémhabok és kompozitok előállítása infiltrációs eljárással. Bányászati és kohászati lapok Kohászat, 140 (2007) 5, 41-46.
- [20] Bolschakov M, Németh Á, Nyári P, Palotás B: Fémszivacsok hegesztése. Hegesztéstechnika, 16 (2005) 1, 11-15.
- [21] Blucher JT, Dobranszky J, Narusawa U: Aluminium double composite structures reinforced with composite wires. (2004) Materials Science & Engineering A, 387-389C, (2004) 867-872.
- [22] Kientzl I, Dobranszky J: Production and Examination of Double Composites. Materials Science Forum 537-538 (2007) 191-197.