

Szintaktikus fémhabok gyártása és vizsgálata – szakirodalmi összefoglaló Production and investigation of metal matrix syntactic foams – a literature survey

Orbulov Imre Norbert DSc.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék
MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport
1111, Budapest, Műegyetem rakpart 3.
orbulov@eik.bme.hu

Kivonat

A szintaktikus fémhabok lényegében fémmátrixú kompozitok. Előnyük a hagyományos fémhabokkal szemben a nagy fajlagos mechanikai tulajdonságokban rejlik. A szintaktikus fémhabok viszonylag új anyagok, de rohamos fejlesztésük indokoltá teszi gyártásuk és mechanikai tulajdonságaik rövid – ugyanakkor átfogó – bemutatását.

Abstract

Metal matrix syntactic foams are basically metal matrix composites. Their main advantage compared to the conventional metallic foams is in their high specific mechanical properties. Metal matrix syntactic foams are relatively new materials, however, their continuous and fast development justifies a short, but comprehensive review on their production methods and mechanical properties.

Kulcsszavak: szintaktikus fémhabok, fémmátrixú kompozitok, zömítővizsgálat, mechanikai tulajdonságok, fáradás.

Keywords: metal matrix syntactic foams, metal matrix composites, compressive tests, mechanical properties, fatigue.

Bevezetés

A szintaktikus fémhabok (metal matrix syntactic foams) részecskeerősítésű társított anyagok, idegen szóval kompozitok, vagy kompozit-fémhabok (composite metal foams). Nevükben a „szintaktikus” kifejezés a görög „συντακτικός” szóból ered, amelynek jelentése szabad fordításban: „összerendezett” és arra utal, hogy az anyagban az erősítő- vagy töltőanyag részecskéi egymáshoz képest többé-kevésbé rendezett módon helyezkednek el. A szintaktikus fémhabok a részecskeerősítésű kompozitok és a fémhabok csoportjába is besorolhatók, így az

Ashby-féle anyagcsoportosításban [1] a hibridek osztályában helyezkednek el (a szál- és részecskeerősítésű kompozitokkal, szendvicsszerkezetekkel, rácsos szerkezetekkel, kábelekkkel és réteges kompozitokkal együtt). Kompozitok lévén a szintaktikus fémhabok összetevőiket tekintve mátrixanyagból (a legtöbbször Al ötvözet, de elméletileg bármilyen más fém alkalmazható) és erősítőanyagból (üveg, kerámia vagy fém gömbhéjak [2-4]) állnak, amelyek között a terhelésátadásért felelős átmeneti réteg teremtet kapcsolatot.

A szintaktikus fémhabok legmeghatározóbb igénybevétele a nyomás. Ennek hangsúlyosságát az is mutatja, hogy a fémhabokhoz kapcsolódó vizsgálatok közül jelen pillanatban egyedül ez a szabványosított [5, 6]. A fajlagos nyomószilárdság az alumínium mátrixú szintaktikus fémhaboknál (az azonos porozitású) „hagyományos” fémhabokhoz képest 5-10-szeres, míg az adott összehasonlító alakváltozásig elnyelt mechanikai munka 2-5-szörös értéket is elérhet. Külön hangsúlyozandó, hogy a szintaktikus fémhabok jellemző mechanikai tulajdonságai az összetevők változtatásával, utólagos kezelésekkel széles határok között változtathatók és adott alkalmazási célra optimálhatók („tailoring”).

A szintaktikus fémhabok felhasználási területei jelenleg még jobbra kiforratlanok. Elterjedésüket két ok akadályozza: egyrészt – egyelőre – viszonylag nagy gyártási költségük, másrészt a tervezési munkához, méretezéshez szükséges mérőszámok (részleges) hiánya. A fémhabok és szintaktikus fémhabok alkalmazásai hasonlóak a fémmátrixú kompozitokéhoz. A közlekedéstechnikában elsősorban személygépjárművekben (jellemzően felső kategóriás- és luxusautókban) merevítő és energiaelnyelő elemeként, tehergépjárművekben merevségnövelési céllal (például rakodókarok), és a környezetet terhelő zajt csökkentő árnyékoló falakként jelennek meg. Az űrtechnikában kis sűrűségük és nagy fajlagos merevségük miatt alkalmazzák őket tükrök tartóelemeiként, vagy panelek merevítéseiként. Zártszelvényből

készülő teherviselő szerkezetekben, felépítményekben, szendvicsszerkezetekben a fémhab növeli az elemek mechanikai stabilitását. A hadiiparban réteges szerkezetekben, védelmi céllal jelennek meg, elsősorban járműveken (nagyobb kaliberű lövedékek, robbantások, aknák elleni védelem), de stratégiai fontosságú építmények falazatában is alkalmazzák őket. Fontos felhasználási területek lehetnek még az öntéssel készülő, kis- és közepes mechanikai terhelésnek kitett különböző gépházak, burkolatok. A fémhabok, szintaktikus fémhabok elterjedőben vannak az építéstechnikában is: könnyűszerkezetes építmények padlólemezeiként, álmennyezetekként, kültéri burkolóelemekként, lépcsőkként, tűzálló szakaszoló ajtókként, felvonó rendszerek elemeiként alkalmazzák őket [7].

A világban több helyen foglalkoznak hagyományos fémhabok kutatásával és nagy volumenű gyártásával is. Hazánkban az első fémhabokat az 1980-as évek végén az Aluterv FKI-ban állították elő. Nemrégiben pedig hazánkban is megkezdte működését egy fémhabgyártó üzem (Aluinvent ZRt., Felsőzsolca [8]), amely jelenlegi fémhab gyártási kapacitása évenként 1000 tonna. Ezenkívül Magyarország több felsőoktatási intézményében foglalkoznak hagyományos fémhabokkal kutatási és fejlesztési tevékenységük részeként: például a Miskolci Egyetemen (fémhabok fejlesztése), a Széchenyi István Egyetemen (röntgentomográfia, digitális rekonstrukció), a Debreceni Egyetemen (végelelemes analízis) és az Eötvös Lóránd Tudományegyetemen (akusztikus emisszió). Kifejezetten szintaktikus fémhabokkal a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának Anyagtudomány és Technológia Tanszékén jelen doktori mű szerzője és kollégái, hallgatói foglalkoznak a fent felsorolt és külföldi intézményekkel, partnerekkel együttműködve. A hazai kutatómunka 2003-ban indult meg, majd 2005-ben gyorsult fel prof. Blücher József kollégánk nagylelkű laborberendezés adományával. A munkát támogatta egy GVOP pályázat (amely létrehozta a Tanszék kompozitlaborját a 2005. augusztus 25-i ünnepélyes átadással), több OTKA (A, CK, PD) pályázat, két Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és a Junior Prima Díj magyar tudomány kategóriájának elnyerése. Nagy támogatást, motivációt jelentett az MTA–BME Fémtechnológiai Kutatócsoport, és hasonló szerepet tölt be jelenleg is az MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport.

Jelen szakirodalmi összefoglaló bemutatja, rendszerezi és összefoglalja a szintaktikus fémhabok fejlesztésének és mechanikai anyagvizsgálatának terüle-

tén végzett kutatási munka eredményeit a gyártási sajátosságoktól kezdve a szintaktikus fémhabok elterjedését segítő mérőszámok, mutatók meghatározásáig.

1. Szintaktikus fémhabok gyártása és minősítése

A szintaktikus fémhabok gyártása során az alapfeladat a gömbhéjakat úgy beépíteni a megkívánt térkitöltéssel az előírt mátrixanyagba, hogy (i) a gömbhéjak ne sérüljenek meg, (ii) a mátrixanyag ne törjön be a gömbhéjakba és (iii) a gömbhéjak közötti teret a mátrixanyag teljes egészében kitöltse. Ebben a fejezetben a legismertebb gyártási lehetőségeket veszem sorra, különös tekintettel a gáznyomásos infiltrálásra és a nyomásos infiltrációval gyártott szintaktikus fémhabok jellemzőire.

A szintaktikus fémhabok gyártására a szakirodalom több lehetőséget ismertet részletesen. Ezek közül három módszer terjedt el: a porkohászati eljárás, a bekeveréses öntés és a nyomásos infiltrálás. A porkohászati eljárás előnye, hogy változatos anyagú mátrix és gömbhéj kombinációkra alkalmazható és az eljárással a gömbhéjak térkitöltése is beállítható egészen a 74 tf%-os elméleti határig. A módszer egyik első alkalmazásaként vasalapú gömbhéjakkal töltött, ugyancsak vasalapú mátrixanyagú szintaktikus fémhabokat állítottak elő. Az eljárás során a gömbhéjakat egy formába töltötték, majd rezgetéssel tömörítették. A ~100 µm-es méretű mátrixanyag port ezután adagolták a gömbhéjak közé szintén folyamatos rezgetés mellett. A következő lépés egy kétlépcsős hőkezelés (szinterelés) volt, amely során a darab kismértékben zsugorodott, a porszemcsék közötti apró üregek megszűntek és a gömbhéjak, valamint a mátrixanyag között fémes kötés jött létre [9-12]. A módszer tovább gondolatát jelentette, amikor az iszapöntés technológiájához hasonlóan a mátrixanyagot alkotó finom port zagy formájában injektálták a gömbhéjak közé, elkerülve a por alakban történő töltés megkívánta rezgetést [13, 14]. A porkohászati módszer sajtolással kiegészítve sikeresen alkalmazható fém mátrixanyag és kerámia töltőanyag közötti kötés létrehozására, szem előtt tartva a gömbhéjak nyomószilárdsága határolta maximális sajtolási nyomást. A módszer további különlegessége, hogy megfelelő körültekintéssel olyan mátrixanyagok alkalmazására is lehetőséget nyújt, mint az egyébként körülményesen kezelhető titán [15-17].

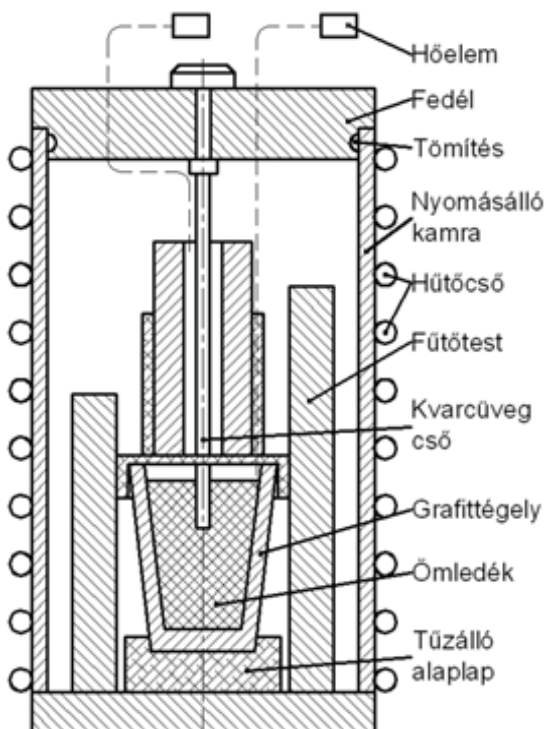
A porkohászati eljárásnál lényegesen egyszerűbb a

bekeveréses öntés technológiája. A megolvasztott mátrixanyagba a gömbhéjakat folyamatos keverés mellett adagolják. A folyamat során figyelemmel kísérik az olvadék hőmérsékletét, a keverési sebességet és a gömbhéjak térkitöltését. A kívánt térkitöltés elérésekor a keverést megszüntetik és a kompozitot formába öntik. Az eljárás előnye, hogy egyszerű, kis befektetést igényel és kis térkitöltésű kompozitok is gyárthatók vele. Hátránya, hogy nagy térkitöltésű kompozitok nem gyárthatók az eljárással (nagy viszkozitás, a gömbhéjak nagy mechanikai terhelése) és nehezen reprodukálható a kompozitok minősége [18-26].

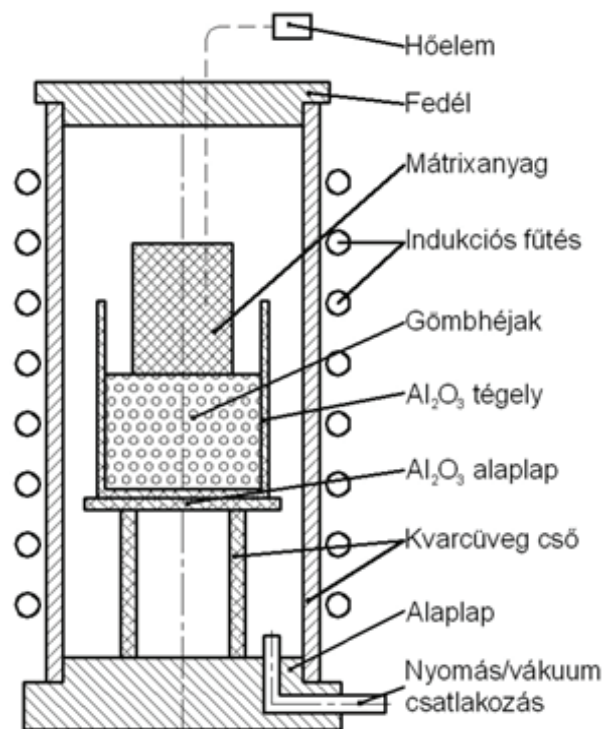
A harmadik gyártási eljárás – az infiltrálás – szintén olvadék állapotban juttatja a mátrixanyagot a gömbhéjak közé, úgy, hogy külső nyomás segítségével biztosítja az infiltráláshoz szükséges küszöbnyomást. Az eljárásnak több alváltozata terjedt el, amelyeket a nedvesítési viszonyok alapján két nagy csoportba lehet besorolni. Amennyiben a nedvesítési viszonyok kedvezőek ($\theta < 90^\circ$), úgy az infiltráció spontán megtörténik (nincs szükség külső nyomásra) és lényegében egyfajta gravitációs öntés valósul meg [27-30]. Ezek a viszonyok jellemzően a fém gömbhéjak fémolvadékkal történő infiltrálásakor állhatnak fent. A szintaktikus fémhabok nagyobb részében azonban üveg, vagy kerámia erősítőanyagot alkalmaznak, amelyek nedvesítési viszonyai általában kedvezőtlenek ($\theta > 90^\circ$) a fémolvadékokban.

Ilyenkor egy határnyomást (küszöbnyomás) meghaladó külső nyomásra van szükség a sikeres infiltrációhoz. A külső nyomás biztosítható valamilyen (inert) gázzal [31-38], vagy mechanikai úton (például egy dugattyúval) [39, 40].

Fontos megjegyezni, hogy a nyomásos infiltrálás nagyfokú hasonlóságot mutat a meleg kamrás kisnyomású nyomásos öntéssel, így vizsgálata alapot adhat a szintaktikus fémhabok tömeggyártásához. Az eljárásnak három technológiai változója van: az infiltrálási nyomás, az infiltrálási idő és az infiltrálási hőmérséklet. A három változó együttesen határozza meg a szintaktikus fémhab gyártható méreteit és minőségét. Megjegyzendő, hogy az infiltrálási hőmérséklet (bár a viszkozitáson, felületi feszültségeken és a kémiai reakciók intenzitásán keresztül befolyásolja a folyamatot), mátrixanyagoként viszonylag szűk sávban kötött. Az infiltrálási nyomás tekintetében a szakirodalomban elérhető modellek lineáris összefüggést jósolnak az infiltrált hossz és az infiltrálási nyomás között [41-47]. Az infiltrálási idő tekintetében a publikált modellek az infiltrált hossz négyzetgyökös függését vezetik le az infiltrálási nyomás (p), a dinamikai viszkozitás (η), a felületi feszültség (γ), a nedvesítési peremszög (θ) és az infiltrálandó erősítőanyag részecskéi között kialakuló kapillárisok jellemző méretének (r) függvényében. Az összefüggések ugyanakkor számos egyszerűsítést tartalmaznak: (i) geometriai egyszerűsítések



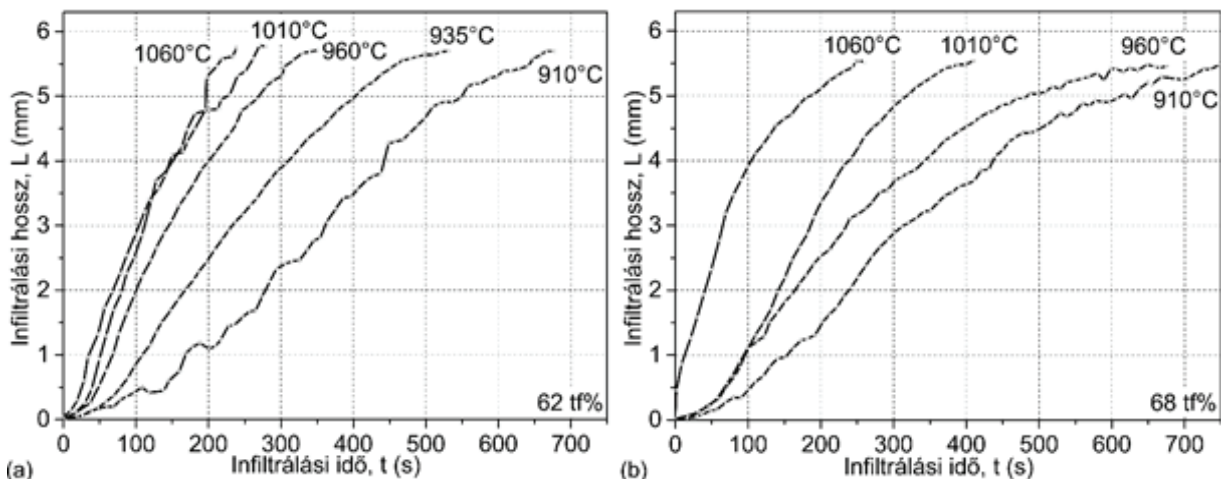
1. ábra Nyomásos infiltráló berendezés, Rohatgi alapján [31]



2. ábra Nyomásos infiltráló berendezés, Palmer alapján [33]

(periodicitás, a kapillárisok alakjának idealizációja), (ii) a lehetséges kémiai reakciók elhanyagolása és (iii) egyéb fizikai hatások elhanyagolása (nedvesítési peremszög időfüggése, légellenállás, gravitáció stb.). Az egyik első munka Washburn levezetése. A szerző egyenes kapillárisokra vonatkozóan zárt összefüggésre jutott az infiltrált hossz és infiltrálási idő között [43], ugyanakkor kijelenti, hogy a bonyolultabb geometria az összefüggéseket is komplexebbé teszi és a fizikai mérések megbízhatóbb eredményeket szolgáltatnak. Semlak és Rhines kötegelt kapillárisokat tartalmazó konfigurációt vizsgálva jutott hasonló eredményre [45]. Asthana és szerzőtársai [41] nemreaktív fémmátrixú kompozit rendszereket tanulmányozva azt a következtetést vonták le, hogy a különösen összetett fizikokémiai és hidrodinamikai hatások kapcsolódása révén összefoglaló, elméleti alapokon nyugvó egyenlet hiányában a direkt kísérletek és mérések célravezetőbbek és

peremszögre gyakorolt hatását vizsgálta fém – oxid-kerámia rendszerekben. Az O befolyásolta kémiai reakciók a nedvesítési peremszöget akár 40°-kal is csökkentheti. Fontos eredményre jutott Muscat és Drew [50] a TiC és Al nemreaktív rendszer példáját vizsgálva. Méréseik újfent kimutatták a rövid infiltrálási idő tartományában megjelenő inkubációs szakaszt (3. ábra). Összefoglalva, megállapítható, hogy habár a szakirodalom kiterjedten foglalkozik az infiltrálási paraméterek hatásainak leírásával, nem áll rendelkezésre teljes elméleti modell az infiltrálási hossz meghatározására. A szakirodalomban javasolt modellek jelentős befolyású fizikokémiai hatásokat hanyagolnak el, így a mérések vezetnek a legjobb eredményre. A nyomásos öntésbe történő átültetés miatt, különösen fontosak a rövid időtartományban ($t < 10$ s) végzett mérések eredményei, amelyek tisztázhatják a szakirodalomban gyakran csak inkubációs szakasznak nevezett tartomány tulajdonságait.



3. ábra Az infiltrált hossz változása az infiltrálási idő és hőmérséklet függvényében TiC és Al nemreaktív rendszerében (a) 65 tf% és (b) 68 tf% térkitöltés, Muscat és Drew [50] nyomán

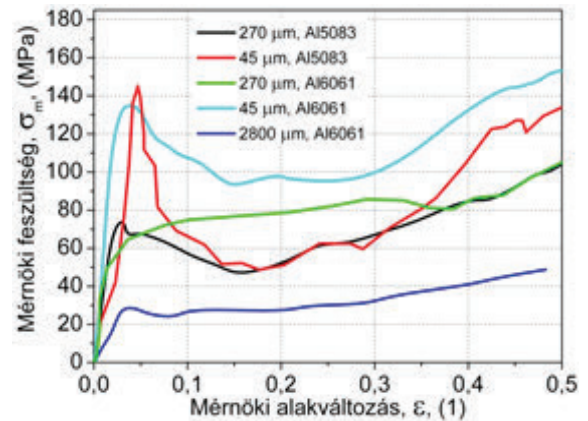
pontosabb eredményt nyújtanak. Garcia-Cordovilla csoportja [42] megvilágította, hogy az elméleti megközelítéseknek vannak bizonyos hiányosságaik, például nem adnak magyarázatot az infiltrált hossz – infiltrálási idő diagramokon megfigyelhető inkubációs szakaszra. Kaptay [45] elméleti alapon, a felületi energiák elmélete felől megközelítve tanulmányozta a kapilláris áramlások dinamikáját nagy hőmérsékleten. Kevorkijan [48] 7 t% Si-mal és 0,3 t% Mg-mal ötvözött alumínium infiltrációját vizsgálta több erősítőanyag (SiC, Si₃N₄, AlN, Mg₃N₂, TiO₂, SiO₂) kapcsán. Eredményei mindig az egyenletek által prognosztizált négyzetgyökös összefüggést mutatták az infiltrált hossz és az infiltrálási idő között. Eustathopoulos társaival [49] az O, nedvesítési

2. A szintaktikus fémhabok kvázi-statisztikus szabadzömítése

A fémhabokat szerkezetüknél fogva leginkább a nyomás jellegű igénybevételeknek kitett alkalmazásokban használják. A szakirodalomban található, a szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságaival foglalkozó publikációk ~80%-a is a nyomóvizsgálattal meghatározható jellemzőkre koncentrálnak. Az összehasonlíthatóság kedvéért a nyomóvizsgálatot és a vizsgálattal meghatározható eredményeket szabványosították is [5, 6].

Ez a fejezet rövid áttekintést ad a szakirodalom vonatkozó részeiből a legfontosabb megállapításokra szorítkozva. Balch és kollégái [51, 52] (4. ábra) a mát-

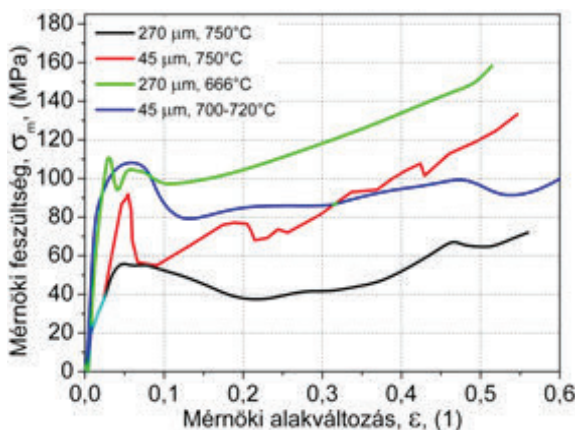
rix- és az erősítőanyag közötti terhelésátadást vizsgálták diffrakációs módszerekkel Al ötvözet mátrixú szintaktikus habokban. Kimutatták, hogy a legjobban kihasználható szintaktikus fémhabokban a mátrixanyag folyáshatárának és a beépített gömbhéjak törési szilárdságának célszerű minél közelebb esnie. Emellett a vizsgálatokat növelt alakváltozási sebességgel végezve 10-30%-os szilárdságnövekedést tapasztaltak. Dou és munkatársai [53] kvázi-statisz és növelt alakváltozási sebességű, síklapok közötti zömítéssel kimutatták, hogy az Al ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabok határozott alakváltozási sebesség érzékenységet mutatnak. Goel és társai [54, 55] Al ötvözet mátrixú szintaktikus habok dinamikus igénybevétel hatására tanúsított viselkedését tanulmányozták. Kimutatták, hogy a szintaktikus fémhabok egy adott alakváltozási sebességnél nyújtották a legkedvezőbb nyomószilárdságot és energiaelnyelő képességet. Lehmhus, Peroni és munkatársai vasötvözet mátrixú, üveg gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok vizsgálatát végezte el több alakváltozási sebesség mellett. A vizsgálatok eredményeiből arra következtettek, hogy a fémhabok alakítási sebesség érzékenysége elsősorban a mátrixanyag hasonló tulajdonságával van összefüggésben [14, 52, 53]. Luong és munkatársai [58, 59] Al és Mg ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabokat hasonló módszerekkel vizsgálva arra jutott, hogy az alakváltozási sebesség növekedésével a nyomószilárdság és az energiaelnyelő képesség is monoton nő. Ugyanez a kutatócsoport extrém kis sűrűségű ($0,97 \text{ gcm}^{-3}$), SiC gömbhéjakkal előállított Mg ötvözet alapú szintaktikus habok vizsgálatát is elvégezte. A nyomószilárdság és a törési energia az alakváltozási sebesség függvényében nőtt, és elérte a kvázi-statisz körülmények között mért értékek másfélszere-



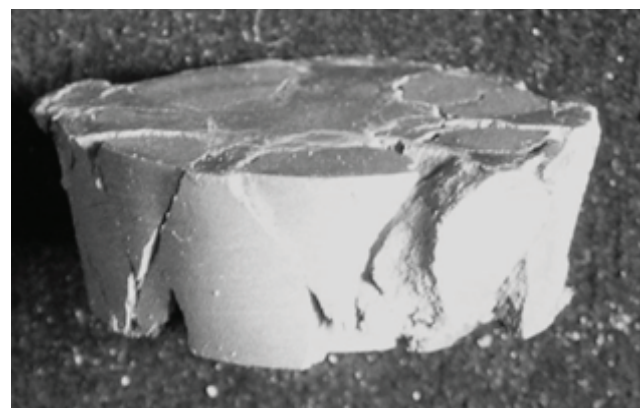
5. ábra Al5083 és Al6061 szintaktikus habok nyomófeszültség-alakváltozás görbéi, Palmer és társai nyomán [33]

sét is [60]. Mondal és szerzőtársai [22, 24] keveréssel előállított Al ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabokat vizsgáltak szoba- és növelt hőmérsékleten. Méréseik kimutatták, hogy a gömbhéjak térkitöltésének növelésével a platófeszültség hatványtörvény szerint csökkent. Palmer és társai [33] (4-6. ábrák) már a gömbhéjak méretének hatására is kitértek és Al ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabokat vizsgálva megállapították, hogy megfelelő mátrix – gömbhéj – hőkezelés kombinációkkal a szintaktikus fémhabok tulajdonságai optimálhatók. A gömbhéjak falának mikroszerkezetét vizsgálva megállapították, hogy a nagyobb átlagos átmérőjű (és falvastagságú) gömbhéjak több mikroszerkezeti hibát tartalmaznak, mint a kisebbek (és vékonyabb falúak), ennek megfelelően pedig a kisebb gömbhéjak nagyobb szilárdságot biztosítanak, mint a nagyobbak.

Rohatgi és munkatársai a gömbhéjak térkitöltését vették górcső alá. Méréseik során megállapították, hogy a sűrűség növekedésével (a gömbhéjak



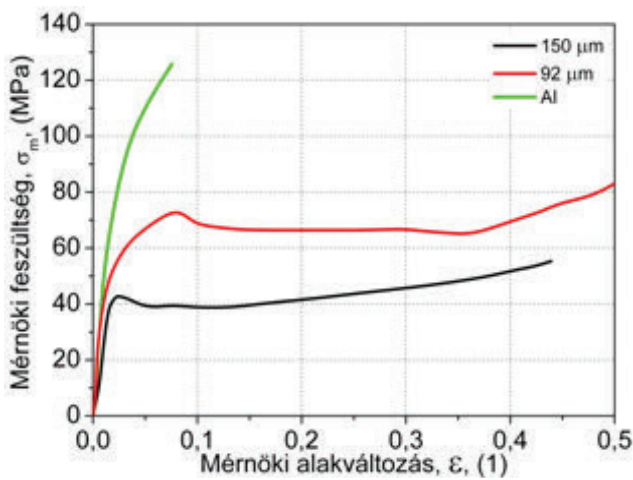
4. ábra Al1350 mátrix anyagú szintaktikus habok nyomófeszültség-alakváltozás görbéi és Balch és társainak [51, 52] eredménye (kék), Palmer és társai nyomán [33]



6. ábra 50 %-os alakváltozásig zömített próbatest képe, a próbatest egyben maradt, Palmer és társai nyomán [33]

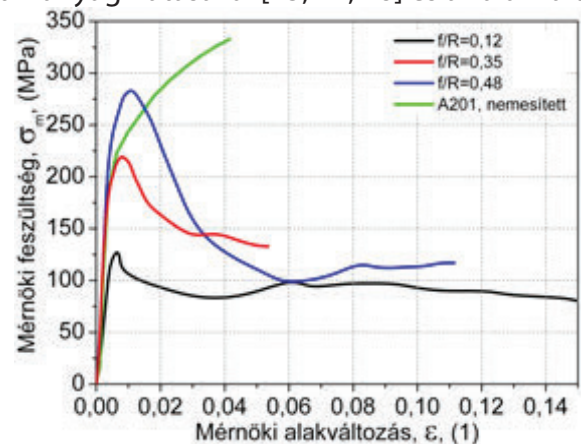
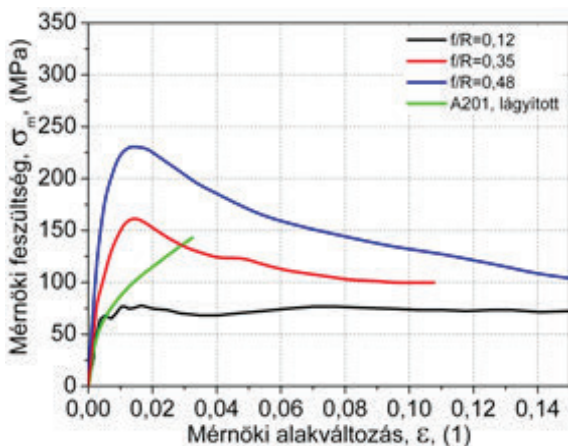
mennyiségének csökkenésével) a nyomószilárdság és a merevség is növekedett. A milwaukee-i egyetem munkatársai [61-63] Al_2O_3 anyagú gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabokat vizsgáltak kvázi-statisztikus és dinamikus körülmények között. A mérési eredmények alapján módszert adtak a mechanikai tulajdonságok becslésére is. Tao és kollégái [64, 65] gáznomásos infiltrálással állítottak elő Al-Mg-Si ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabokat, amelyeket húzó-, nyomó- és nyíró vizsgálatoknak is alávetettek. További Al porszemcsék beépítésével (a gömbhéjak térkitöltésének csökkentésével) a szívósság, a nyomószilárdság és az elnyelt fajlagos energia növekedését figyelték meg. Wu és munkatársai [66] (7. ábra) Al ötvözet mátrixú szintaktikus

nyek alapján kapcsolatot teremtettek a gömbhéjak falvastagsága és a szintaktikus fémhabok nyomószilárdsága között. Megállapították, hogy a kisebb átlagos átmérőjű gömbhéjak nagyobb szilárdságot biztosítottak. Zhang és Zhao [39] a gyártási költségek csökkentésének céljával vizsgálta az olcsóbb, ámde kevésbé kontrollált minőségű gömbhéjak alkalmazásának lehetőségét kvázi-statisztikus és dinamikus mérési körülmények között is. Munkájuk során megállapították, hogy a fémhabok platófeszültsége és energiaelnyelő képessége nagyobb mértékben függ az Al ötvözet mátrix tulajdonságaitól, mint az alkalmazott gömbhéjak jellemzőitől. Kiser [105] a hőkezelés hatását is vizsgálta a gömbhéjak tulajdonságainak és méretének függvényében (8. ábra). Zou és szerzőtársai [67] Al ötvözet mátrixú szintaktikus habok tulajdonságait vizsgálták dinamikus nyomó igénybevétel (split-Hopkinson rúd) hatására. Kimutatták, hogy a nagyobb alakváltozási sebesség nagyobb szilárdságértékeket és elnyelt mechanikai energiát eredményezett. Fiedler és kutatócsoportja [68-71] kis költséggel előállítható, építőipari perlitet tartalmazó szintaktikus fémhabokat vizsgált kvázi-statisztikus és dinamikus körülmények között. A kvázi-statisztikus eredményekhez képest a nyomószilárdság kismértékű növekedését mutatták ki. Megállapították, hogy a perlit jelenléte jótékony hatással van a nagy sebességű igénybevételnek történő ellenállásra, vélhetően a perlitszemcsékben, az alakváltozás hatására felépülő gáznomásnak köszönhetően. Az eddigi részleteket illetően, saját kutatómunkájában a szerző az infiltrálás paramétereinek, a szintaktikus fémhabok tulajdonságaira gyakorolt hatásával [35], a gömbhéjméret hatásával [72-74], a gömbhéjak anyagának hatásával [75, 76], a mátrixanyag hatásával [73, 77, 78] és az alakváltozá-



7. ábra Jellemző nyomódiagramok, Wu és társai nyomán [66]

fémhabok kvázi-statisztikus nyomóvizsgálatát írták le. Megállapították, hogy lágyított állapotban a fémhabok még nagy képlékeny alakváltozásokat is képesek törés nélkül elviselni. A mérési eredmé-



8. ábra Lágyított (balra) és nemesített (jobbra) állapotú A201 mátrix anyagú szintaktikus fémhabok és mátrixanyaguk mérési feszültsége a mérési alakváltozás függvényében, Kiser és társai nyomán [105]

si sebesség hatásával [79, 80] foglalkozott.

A szintaktikus fémhabok elvileg bármilyen fémöt-vözettel előállíthatók. Erre mutat példákat Huang és csoportja [81, 82], és Daoud [20] valamint Rohatgi és munkatársai [83, 84] magnézium ötvözet, Daoud pedig [18, 20] cink mátrixanyagú fémhabokkal. A gömbhéjak csökkentették a sűrűséget és a szintaktikus fémhabok, a „hagyományos” (gömbhéjak felhasználása nélkül) gyártott fémhaboknál jóval merevebbek és nagyobb szilárdságúak voltak. Peroni és társai [85, 86] vas ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabokkal kísérleteztek, amelyekben az erősítőanyagot üveggömbhéjak halmaza adta. Ezek a fémhabok ugyan az alumínium alapú társaiknál jóval nagyobb sűrűségűek, a nyomószilárdságuk is jelentősen megnövekedett. Így a fajlagos tulajdonságok közel változatlanok maradtak, de jóval olcsóbb alapanyagokat használtak fel. Castro és Nutt [30, 40] is vasötvözet mátrixú szintaktikus fémhabokkal kísérletezett, de az erősítést Al_2O_3 anyagú gömbhéjak alkották. A gravitációs öntéssel, illetve nyomásos infiltrálással történő gyártás mellett a fémhabok nyomóvizsgálati jellemzőit és kis sebességű idegen tárgy becsapódásakor mutatott tulajdonságait is vizsgálták [87]. Rabiei és kollégái [9, 10, 12, 46, 47] vasötvözet alapú gömbhéjakat alkalmaztak Al ötvözet és vasalapú szintaktikus fémhabok előállításához többnyire porkohászati módszerrel. A szintaktikus fémhabok kiemelkedő elnyelt energia – sűrűség hányadost mutattak. Zhang és Ma [88] pedig karbon mátrixú, karbon gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus habok gyártását és vizsgálatát mutatta be.

A szintaktikus fémhabok előállításához általában egy unimodális eloszlású, a lehetőségek szerint minél kisebb méretszórású gömbhéj halmazt alkalmaznak erősítőanyagként. Ugyanakkor érdekes lehetőségeket vet fel két, vagy esetleg több, alapvetően (akár anyagában, akár átmérőjében) különböző gömbhéjhalmaz használata. Tao és társai [89] azonos anyagú, de különböző átlagos átmérőjű, bimodális átmérő eloszlású gömbhéjakat építettek Al ötvözet mátrixba. A különböző névleges átmérőjű frakciók arányát változtatva megállapították, hogy a szintaktikus fémhab sűrűsége (az unimodális gömbhéjakat tartalmazó habokhoz képest) akár 25%-kal csökkenthető. A bimodális gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabok állandó és nagy feszültség szintű platós szakaszt és kiváló energiaelnyelő képességet mutattak. Daoud [19] a „hagyományos” és szintaktikus fémhabokat kombinálta úgy, hogy egy gázzal habosító módszernél alkalmazott alapanyagba kerámia gömbhéjakat kevert. A hibrid hab

zömítés során szívósabb viselkedést és nagyobb nyomószilárdságot mutatott, mint „hagyományos” társaik. Hasonló megoldást alkalmazott Xia is társai-val [90]: az ömledékhabosító eljárás során különböző minőségű és mennyiségű kerámia gömbhéjakat adagolt az ömledékhez. A vizsgálataik kimutatták, hogy a fémhabok cellafalaiban elhelyezkedő kerámia gömbhéjak jelentős hatással vannak a nyomószilárdságra, az alakváltozási- és energiaelnyelő képességre. Külön kutatási terület a szintaktikus fémhabok és hibrid habok kopási tulajdonságainak vizsgálata, amit hazai műhelyekben is folytatnak [91-97].

Összefoglalva, a szakirodalomban számos anyagpár és külső körülmény, tényező hatását vizsgálták a szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságaira vonatkozólag. Ezek a részletek helyenként elmentmondásosak és nem nevezhetők teljeskörűnek. A hatékony és biztonságos tervezéshez azonban szükség van az anyagi jellemzőkre, valamint a kapcsolatokra az anyagi jellemzők és a szintaktikus fémhabok gyártási módszere (lásd előző fejezet), összetevői, állapota között.

3. A szintaktikus fémhabok növelt alakváltozási sebességű zömítése

A szintaktikus fémhabok – mint általában a fémhabok – egyik első alkalmazási gondolata a lökés-, ütközés csillapítás volt, később felmerült (jelenleg is fejlesztés alatt áll) a személy-, gépjármű- és épületvédelem kérdésköre is. Ezeknél az alkalmazásoknál jelentős szerep jut a nagy sebességű igénybevételek ellenében mutatott ellenállásnak, ez motiválta az erre irányuló méréseket. Ennek megfelelően ebben a fejezetben, az előállított szintaktikus fémhabok növelt alakváltozási sebességű nyomóvizsgálatainak eredményeit ismertetem.

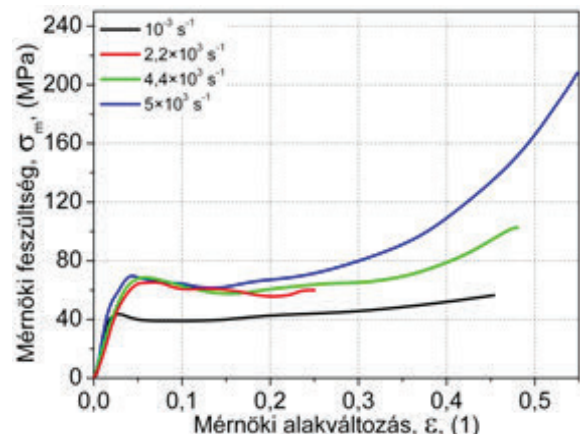
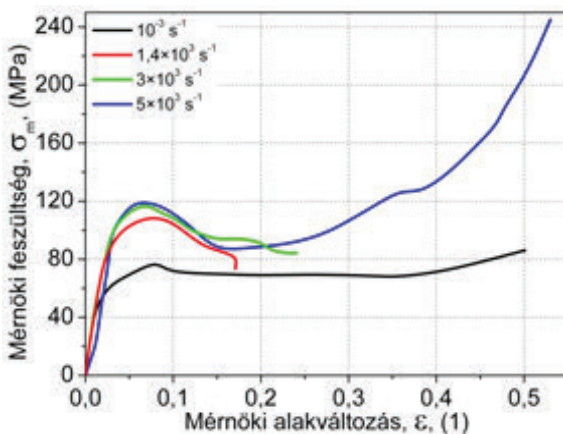
A kvázi-statisztikus állapotban végzett vizsgálatokkal ellentétben a fémhabok nagy alakváltozási sebességre adott válasza kevésbé kutatott, annak ellenére, hogy az ütközési zónákban való alkalmazásban komoly szerepet tölthetnek be. Ebben az alfejezetben a szakirodalom azon elemeit ragadom ki, amelyek a növelt alakváltozási sebesség hatásának leírására törekednek.

Balch és társai kerámia mikrogömbhéjjal töltött tiszta alumínium, illetve Al-Zn ötvözet mátrixú fémhabot gyártottak és vizsgáltak. Kvázi-statisztikus körülmények mellett a nyomószilárdság 100 MPa-ra, illetve 230 MPa-ra adódott, ehhez képest a dinamikus nyomóvizsgálat (2300 s^{-1}) a nyomószilárdsági érték

10-30%-os növekedését eredményezte [52]. Gupta és társai Al-Si-Mg-Cu és Mg-Al-Zn-Mn mátrixanyagú szintaktikus fémhabokat vizsgáltak. Nagyobb alakváltozási sebesség mellett nagyobb nyomószilárdságot és nagyobb energiaelnyelő képességet mértek [58, 59]. Vizsgálataikat kiegészítették SiC gömhéjakkal töltött Al-Si-Mg ötvözet mátrixú fém kompozitok kvázi-statisztikus és dinamikus tulajdonságainak vizsgálatával és megállapították, hogy a minták nyomószilárdsága nem mutat összefüggést az alakváltozás sebességével [98, 99]. Vizsgálataikat magnézium mátrixszal megismételve másfélszeres nyomószilárdságot mértek [60]. Santa-Maria és társai Al-Si-Cu-Zn ötvözet mátrixú Al_2O_3 mikrogömhéjakkal töltött szintaktikus fémhab kvázi-statisztikus és dinamikus tulajdonságait vizsgálták. A méréseket $880 s^{-1}$ -os és $1720 s^{-1}$ -os alakváltozási sebesség mellett végezték. A fémhabok mechanikai tulajdonságai nem függtek az alakváltozási sebességtől, azok értékei hasonlóak voltak a kvázi-statisztikus vizsgálatokból kapott értékekhez [72]. Zou és társai alumínium mátrixú szintaktikus fémhabok dinamikus tulajdonságait vizsgálták split-Hopkinson teszttel. A dinamikus terhelés alatt tapasztalt energiaelnyelés 70%-kal nagyobb volt a kvázi-statisztikus terheléskor tapasztaltnál képest. Ennélfogva, az alumínium mátrixú szintaktikus fémhabok alkalmasak lehetnek légi járművekben és az autóiipari egyes területein való alkalmazásra a nagy fajlagos szilárdságuknak és kiváló energiaelnyelő képességüknek köszönhetően [73]. Dou és társai cenosphere-rel töltött tiszta alumínium mátrixú szintaktikus fémhabok nagy alakváltozási sebességű nyomóvizsgálatát végezték el. Úgy találták, hogy egyértelmű összefüggés van

az alakváltozási sebesség és a nyomószilárdsági érték között, ami a kvázi-statisztikus terheléskor mért 45-75 MPa-ról 65-120 MPa-ra nőtt. Megfigyelték továbbá az energiaelnyelő képesség 50-70%-os növekedését is [63].

Goel és társai cenosphere-rel töltött alumínium mátrixú szintaktikus fémhabok nyomóvizsgálatával foglalkoztak, amit kvázi-statisztikus állapot és nagy, $1400 s^{-1}$ -os alakváltozási sebesség közötti értékeken végeztek el. Megállapították, hogy a vizsgált szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai nagy alakváltozási sebességtől való függést mutatnak [54, 55, 100]. Fiedler és társai Al-Si-Mg ötvözet mátrixú, építőipari perlittel töltött szintaktikus fémhabok dinamikus nyomóterhelés melletti vizsgálatát végezték el. A vizsgálatok alapján úgy találták, hogy az anyag szilárdsági értékei kismértékben, de nőttek az alakváltozási sebesség növelésével [68]. Mondal és társai alumínium mátrixú szintaktikus fémhabot vizsgáltak különböző alakváltozási sebességek (10^{-2} - $10^{-1} s^{-1}$) mellett. Az alakváltozási sebesség hatása elhanyagolható mértékű volt [101, 102]. Lehmus és társai üveg gömhéjakkal töltött vas mátrixú fémhabokat vizsgáltak. Több különböző típust állítottak elő, amelyekben a töltőanyag szilárdsága és mennyisége (t%) különböző volt. Az alakváltozási sebességtől való függés döntően az alkalmazott mátrixanyagtól függött [14, 56, 57]. Rabiei és társai acél-acél és alumínium-acél fémhab kompozitokat állítottak elő különböző pórusméretekkel gravitációs öntéssel és porkohászati eljárással. A vizsgálatok alapján megállapították, hogy a vizsgált anyagok fajlagos energiaelnyelő képessége a 2,2 mm-es gömbökkel töltött hab kompozitoknál 30%-kal na-



9. ábra 90 μm -es (balra) és 150 μm -es (jobbra) átlagos gömhéj átmérővel rendelkező szintaktikus habok statisztikus- és dinamikus körülmények között rögzített mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramjai, Dou és társai nyomán [63]

gyobb volt, mint a nagyobb alakváltozási sebesség mellett vizsgált 5,2 mm-es gömbökkel töltött hab kompozitok energiaelnyelő képessége. A terhelés növelésével a folyáshatár egyértelmű növekedését tapasztalták [13, 103, 104].

Az ismertetett kutatások fontos, de olykor ellentmondó információkat adnak a fémhabok dinamikus tulajdonságairól. Ebből arra következtethetünk, hogy habár a vizsgált anyagok felépítése hasonló, tulajdonságaik nagyban függenek az alkotóik viselkedésétől.

4. A szintaktikus fémhabok radiális irányban gátolt zömítése

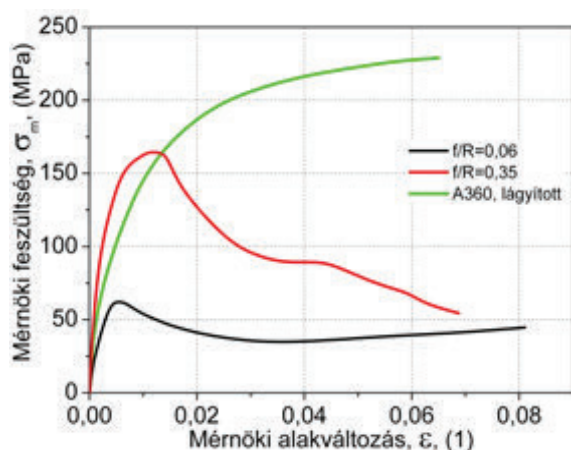
A szintaktikus fémhabok alkalmazási példái többször irányoznak elő olyan beépítési módot, amikor az alkatrész nyomó igénybevétel alatt van, de alakváltozása gátolt. A szintaktikus fémhabok ilyen körülmények közötti tulajdonságait foglalja össze ez a fejezet.

Ebben a témakörben – speciális mivolta és nehezebb kivitelezhetősége miatt – jóval kevesebb szakirodalmi forrás érhető el. Így jóval kevesebb információ áll rendelkezésre a gátolt alakváltozás okozta, többtengelyű feszültségi állapotban lévő szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságairól. Ennek a területnek a vizsgálata két okból indokolt. Egyrészt a gátolt alakváltozási körülmények között terhelt fémhabok várhatóan jóval nagyobb mechanikai energiát képesek elnyelni alakváltozásuk során, mint a sík lapok közötti szabad zömítés

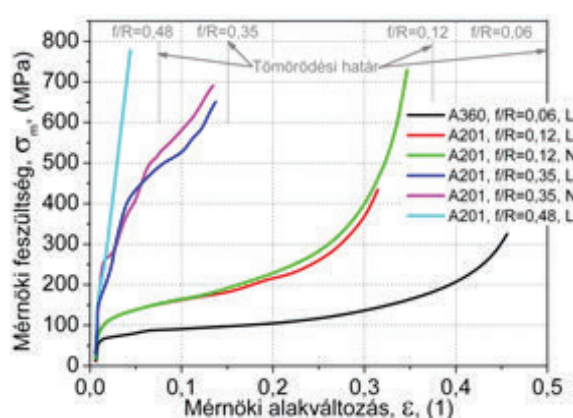
során. Másrészt azokban az alkalmazásokban, ahol üreges szelvényeket építenek be, a szintaktikus fémhab töltőanyaggal jelentősen növelhető a szerkezet mechanikai stabilitása, a stabilitásvesztésnek történő ellenállása.

Kifejezetten ezzel a problémakörrel foglalkoztak Kiser és munkatársai [105] (10. és 11. ábra) a vegyoxid kerámia gömbhéj erősítésű, alumínium ötvözet mátrixú szintaktikus habok vonatkozásában. Munkájukban a szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságait vizsgálták síklapok közötti szabad és radiális irányban gátolt, vagyis már a terhelés kezdetétől többtengelyű feszültségi állapotot megvalósító zömítéssel.

A síklapok közötti szabad zömítés során a tönkremenetel már kis tengelyirányú alakváltozás hatására is megindult és egy lokalizált törési sáv formájában jelent meg. Radiális irányban gátolt alakváltozású, többtengelyű feszültségi állapotot jelentő zömítés során az alakváltozáshoz szükséges feszültség fokozatosan és monoton növekedett, valamint a szintaktikus fémhabok energiaelnyelő képessége kimagaslóan nagy volt. Ezen eredmények alapján a szerzők azt a következtetést vonták le, hogy a szintaktikus fémhabok kiváló anyagok lehetnek olyan alkalmazásokhoz, ahol lokálisan nagy terhelésnek (például becsapódó anyagdarab), globálisan pedig nyomó terhelésnek vannak kitéve. A kutatók kiemelik azt is, hogy a gömbhéjak mennyiségének és alakjainak jellemzőinek (átmérő, átmérő / falvastagság hányados) célszerű megválasztásával a szintaktikus fémhabok energiaelnyelő képessége és nyomószilárdsága



10. ábra Lágyított állapotú A360 mátrixanyagú szintaktikus fémhabok és mátrixanyaguk mérnöki feszültsége a mérnöki alakváltozás függvényében, Kiser és társai nyomán [105]



11. ábra Radiális irányban gátolt alakváltozású próbatestek mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás diagramjai (L=lágyított, N=nemesített), Kiser és társai nyomán [105]

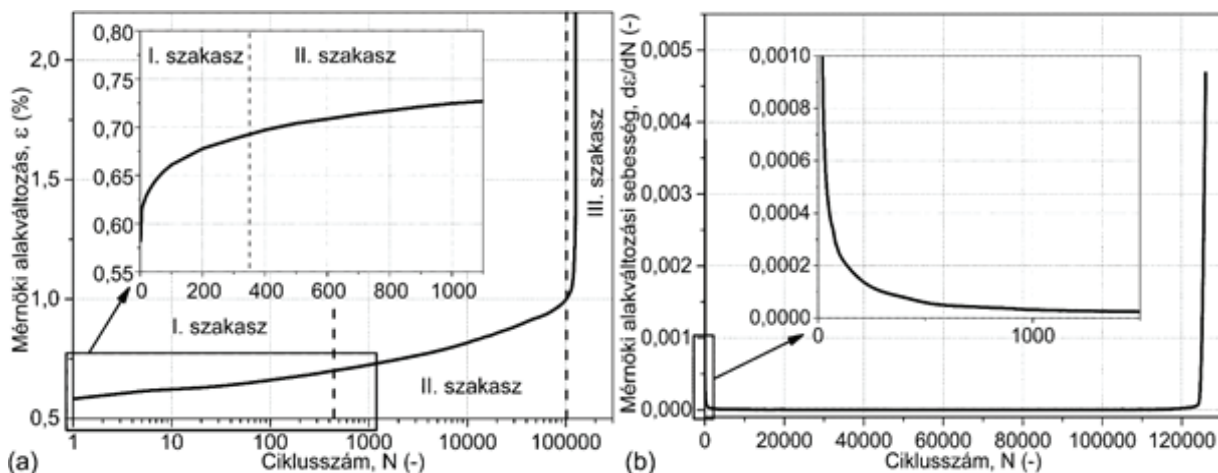
testreszabható.

Tao és kollégái Al-Mg-Si ötvözet mátrixú, SL típusú, vegyesoxid kerámiából álló gömbhéjakkal erősített szintaktikus fémhabokat vizsgáltak [65]. Az anyagok tulajdonságainak elemzése mellett a próbatestek tönkremenetelét is vizsgálták és megállapították, hogy a sík lapok közötti zömítés során a tönkremenetel módja egy határozott törési sáv megjelenése (Griffith-féle hasadásos törés), amely a terhelési iránnyal ~45-os szöget zár be, vagyis a legnagyobb nyíróigénybevételnek megfelelő síkban jelentkezik. A radiális irányban gátolt alakváltozású zömítések-nél a próbatestek fokozatos tömörödését figyelték meg, kitüntetett hasadási sík nem jött létre a darabokban. A mátrixanyag képlékeny deformációjával kitöltötte az összeroppanó gömbhéjak által üresen hagyott teret és ennek során a próbatestek nagymértékű mechanikai energiát nyeltek el. Ehhez a területhez kapcsolódóan a szerző is végzett kísérleteket, figyelembe véve a gömbhéjak méretének, a mátrixanyag minőségének és a szintaktikus fémhabok hőkezeltiségi állapotának hatását [106].

5. A szintaktikus fémhabok viselkedése ismétlődő nyomó igénybevétel hatására

Ipari környezetben üzemelő gépekben gyakori igénybevételi forma az ismétlődő (nem ritkán időben változó feszültségparaméterekkel leírható) ciklikus igénybevétel. A szakirodalomban fellelhető források nagyon korlátozott adatforrást nyújtanak a fémhabok (általában a fémhabok) fáradási jellemzőiről, különösen kevés és korlátozott az elérhető eredmény a szintaktikus fémhabokra vonatkozóan. Ebben a fejezetben a szintaktikus fémhabok fáradási tulajdonságairól esik szó, lüktető nyomó igénybevétel hatására.

Összefoglaló munkájukban Ashby és munkatársai [107] kitérnek a különböző fémhabok húzó, nyomó és nyíró módú fárasztására és javaslatokat fogalmaznak meg a próbatestek alakjára és méreteire vonatkozóan. Hasonló mintát követve Degischer és Kriszt összefoglalja a vizsgálatok általános körülményeit és eredményeit [108]. Soubielle és társai ~400 µm pórusméretű, nyílt cellás fémhabokat vizsgált lüktető húzó terheléssel (R=0,1). A habok ciklikus kúszást mutattak, aminek mértékére erős hatással volt a habok relatív sűrűsége [109]. Amsterdam és társai porkohászati úton előállított Al-Ti fémhabokon végeztek szakítóvizsgálatokat és ciklikus húzóvizsgálatokat. A lüktető húzóterhelés először kismértékű, majd egyre gyorsuló ütemű alakváltozást eredményezett, ami a próbatest törésével végződött. A fáradásos repedések a terhelésre merőleges irányban terjedtek az α-Al dendriteken keresztül, ami a kiválásoktól csaknem teljesen mentes töretfelülethez vezetett [110]. Harte és kutatótársai lüktető húzó és lüktető nyomó terhelés (R=0,1) mellett hasonlítottak össze kereskedelmi forgalomban kapható nyílt- és zártcellás fémhabokat. A nyílt cellás fémhabok egyenletes pórusméretüknek és szerkezetüknek köszönhetően egyenletes alakváltozást mutattak. Ezzel szemben a kevésbé homogén felépítésű zártcellás fémhabokban egyetlen törési zóna jött létre, amely a ciklusok számával egyre szélesedett, monoton alakváltozás mellett [111]. McCullough és Fleck hasonló terhelési körülmények között vizsgált Al-Mg-Si alapanyagú fémhabokat a 0,1-0,4 relatív sűrűség tartományban. A fémhabok kifáradási határa a relatív sűrűséggel nőtt és a domináns tönkremeneteli forma a próbatestek lassú, majd egyre gyorsuló, de monoton alakváltozása volt, ami arra utal, hogy az élettartam nagyon érzékeny a terhelési



12. ábra Idealizált alakváltozás-ciklus (a) és alakváltozási sebesség-ciklus (b) görbéi

amplitúdóra [112]. Banhart és Brinkers porkohászati úton, 0,5 t% TiH₂ habosítóanyaggal előállított Al-Si ötvözet alapanyagú (Al+7 t% Si), különböző relatív sűrűségű zártcellás fémhabokat vizsgált. A hengeres próbatesteket (R=0,1) feszültségaszimmetria-tényezőjű lüktető nyomó igénybevétellel terheltek. A vizsgálatok során a szerzők rámutattak, hogy az eredmények értelmezése erősen függ a tönkremeneteli kritériumtól, amit azonban a habok alakváltozási mechanizmusainak következtében nem magától értetődő definiálni [113]. Hasonló szerkezetű, de tiszta alumínium alapanyagból készített fémhabokat vizsgáltak Sugimura és társai, akik munkájukban először alkalmaztak olyan online képelemző berendezést, amellyel lehetővé vált a deformációs sávok megjelenésének és vastagodásának nyomon követése. A vizsgált zártcellás fémhabok viszonylag rövid élettartamot mutattak, a tönkremenetel a cellafalak stabilitásvesztéséből kiinduló erős alakváltozási sávok megjelenésével és vastagodásával ment végbe [114]. A fémhabok fáradásos károsodása három szakaszba osztható be, ezt mutatja meg a 12. ábra idealizált esetre.

Zhou és Soboyejo három, különböző hőkezeltégi állapotban (gyártás utáni állapot, lágyított állapot és mesterségesen öregített állapot) vizsgált Al-Mg-Si alapanyagú, nyílt cellás fémhabokat. A ciklikus terhelések hatására repedések jelentek meg a cellaéleken, amelyek addig terjedtek, míg a cellaél teljes egészében el nem törött. A törött cellaélek környezetében a terhelés a szomszédos cellaélek között oszlott meg, ami a sérülés mértékének gyorsulásához, majd alakváltozási sávok létrejöttéhez vezetett. Az alakváltozási sávok kialakulása jól nyomon követhető volt a próbatest makroszkopikus alakváltozásában tapasztalt apró ugrásokban [115, 116]. Lehmhus és munkatársai porkohászati úton előállított Al-Mg-Si anyagú fémhabokat vizsgált gyártási és kiválásosan keményített állapotban, lüktető nyomó igénybevétellel. A kiválásos keményítés szilárdságra gyakorolt pozitív hatása csak kismértékben jelentkezett a fáradási tulajdonságokban. A jelenséget a kiválásos keményedés okozta részleges ridegességgel és a kezdeti repedések számának, a hőkezelés alatt történt növekedésével magyarázták [117]. Lin és kollégái egy TiNb ötvözetből előállított nyílt cellás fémhab csontpótló anyagként történő alkalmazásának lehetőségét hangsúlyozzák munkájukban. A kvázi-statikusan vizsgálatok a klasszikus, fémhabokról alkotott képbe illeszkedtek, míg a fáradási viselkedés a [115, 116] publikációkban ismertetthez volt hasonlatos. A fáradásos tönkremenetelt

okozó repedések a legnagyobb pórusok közelében elhelyezkedő cellaélek felületén jelentek meg [118]. Hakamada és társai sókioldásos technikával előállított alumínium habok ciklikus nyomóvizsgálatával foglalkoztak. A ciklikus terhelés során a próbatestek alakváltozása fokozatosan nőtt, az alakváltozás értékben ugrás nem volt megfigyelhető [119]. Zettl és munkatársai porkohászati úton gyártott Al-Si és Al-Mg-Si alapanyagú, zártcellás fémhabokat vizsgált nullkezdésű lengő igénybevétellel és ultrahang tartománybeli frekvenciával. Minden vizsgált fémhab kifáradási határa ~20%-a volt a platófeszültségnek, amit további ~15%-kal lehetett növelni megfelelő kiválásos keményítés segítségével. A tönkremenetelt repedésterjedés okozta, a repedések megjelenésének kitüntetett helyei voltak a cellafalakban esetlegesen jelenlévő kezdeti hibák (zárványok, anyagfolytonossági hiányok). A próbatestek tönkremenetele során nem tapasztalták alakváltozási sávok megjelenését és a vizsgálati frekvenciának elhanyagolható hatása volt több nagyságrenden belül (1 Hz-20 kHz között) [120, 121]. Rabiei és társai olyan zártcellás alumínium habokat vizsgáltak, amelyekbe előzetesen egy bemetszést készítettek. Vizsgálataik célja annak felderítése volt, hogy a bemetszés csúcsában létrejövő hő hogyan befolyásolja a fémhab kifáradási tulajdonságait. A vizsgálataik során megállapították, hogy a képződő hő nem elegendő ahhoz, hogy az anyag kilágyuljon, így a kifáradási mechanizmust elsősorban a cellafalakban jelentkező repedésterjedés uralja [122]. A próbatestek alakjának és méreteinek a kifáradási tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgálta Kim és Kim, zártcellás Al-Si-Ca habokon. Az eredményeikből megállapítható, hogy míg a különböző karcsúságú próbatestek kvázi-statikusan körülmények között mért anyagjellemzői (merevség, folyáshatár, platófeszültség) azonosak voltak, a kisebb karcsúságú próbatestek kifáradási határa jóval kisebbre adódott [123]. Kolluri és társai zártcellás Al habok fáradásos vizsgálataival foglalkoztak lüktető nyomóigénybevétellel síklapok közötti és radiális irányban gátolt alakváltozási körülmények között. Eredményeikkel kimutatták, hogy míg a fáradási tönkremenetelre jellemző, eleinte lassú maradó alakváltozás növekedés független volt a gátolt alakváltozástól, addig a felgyorsuló alakváltozási sebességű szakaszban a hatás jelentős volt [124]. Olurin és munkatársai 0,1-0,4 relatív sűrűség közötti zártcellás Al-Mg-Si habok repedésterjedési tulajdonságaival foglalkoztak. A méréseket klasszikus CT geometriával gyártott próbatesteken, a lineárisan rugalmas törésmechanikai összefüggések alapján végezték.

A mérési eredményekre a Paris-Erdogan összefüggést illesztették, amelynek kitevője extrém nagyra (~20-25) adódott. Ez arra hívja fel a figyelmet, hogy a fémhabok élettartamra méretezésénél a méretezési filozófiának a küszöb feszültségintenzitás tartományt (ΔK_{th}) kell határszámnak tekintenie, a stabil repedésterjedés alapján történő élettartambecslésre irányuló tervezés kockázatos [125]. Szintén a fáradásos repedésterjedéssel foglalkozott Motz és csoportja. Lüktető húzó- és lüktető nyomóvizsgálataikat zártcellás Al habokon és gömbhéjstruktúrákon (HSS – hollow sphere structures) végezték. A mérési eredmények szintén egészen nagy (~6-12) exponenst mutattak a Paris-Erdogan egyenletben, amit részben több repedés egyidejű terjedésével, a repedészáródás jelenségével és a repedések egyesülésével magyaráztak a szerzők. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a fémhabok tönkremenetele nagymértékben függ a szerkezetüktől, felépítésüktől és nagy mennyiségű mérésre van szükség a fáradásos repedésterjedés pontos leírására [126]. Harte és társai már szendvicsszerkezeteket vizsgáltak ismétlődő, négyponos hajlítóvizsgálattal [127]. Még tovább haladva Schultz és társai a fémhabok helikopter alkatrészként történő felhasználási lehetőségeit vizsgálták [128].

Az eddigiek összefoglalásaként megállapítható, hogy a szakirodalomban több és változatos fémhab típust vizsgáltak ismétlődő igénybevételi körülmények között. A legtöbb munkában közös az $R=0,1$ -es feszültségasszimmetria-tényező alkalmazása, ugyanakkor lényegi különbség mutatkozik a vizsgálati frekvenciában. A legrelevánsabb szakirodalmi hivatkozás Rabiei kutatócsoportjától származik, amelyben gravitációs öntéssel készített Al mátrixú, acél gömbhéjakkal töltött, illetve porkohászati úton készített, acél mátrixú és szintén acél gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabokat vizsgáltak. Ciklikus nyomás alatt a próbatestek nagyfokú stabilitást mutattak és az alakváltozást a ciklusszám függvényeként rögzítő diagramot három szakaszra lehetett felosztani: (i) kezdeti szakasz, amelyben az alakváltozás lineárisan változik a ciklusszámmal, (ii) lassú alakváltozás szakasza, ahol az alakváltozási sebesség nagyon kicsi, nagy ciklusszámnál is csak kismértékű alakváltozás jön létre és (iii) nagy alakváltozási sebesség szakasza, ami alatt a próbatest teljes tönkremenetele néhány cikluson belül bekövetkezik. A vizsgált szintaktikus fémhabok alakváltozása homogén volt, alakváltozási sávokat nem tapasztaltak [11]. Hasonló, de nem teljesen azonos fémhabok a már említett gömbhéj struktúrák. Az acél gömb-

héjából felépített szerkezeteket lüktető húzó és lüktető nyomó körülmények között is vizsgálták. Az eredmények azt mutatták, hogy a kifáradási jellemzőkre az alapanyag és az előállítási mód volt a legnagyobb hatással, mégpedig a cellafalak tulajdonságain és a gömbhéjak között létrejött kötések jellemzőin keresztül. Másodlagos paraméternek bizonyult a habok relatív sűrűsége. Az alkalmazott gömbhéjak átmérőjének hatása elhanyagolható volt, elsősorban a kifáradási görbe meredekségére volt hatással, magát a kifáradási határt nem befolyásolta jelentősen [129]. Saját méréseink a klasszikus, kerámia gömbhéjerősítésű Al ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabok fárasztóvizsgálatára irányultak. Vizsgálati változóként a mátrixanyag minőségét és a gömbhéjak átlagos méretét alkalmaztuk [130-133].

6. Összegzés, értékelés

A fenti szakirodalmi ismertetésből és összefoglalásból levonható néhány megállapítás, amelyben a témában publikáló kutatócsoportok, illetve szerzők egyetértenek, illetve vannak olyan megállapítások is, amelyek ellentmondásosak.

A szintaktikus fémhabok gyártását tekintve egyetértés van abban, hogy szintaktikus fémhabok gyakorlatilag bármilyen mátrixanyagból és töltőanyagból gyárthatók a megfelelő technológiával, és a legjobb ismételhetőséget és minőséget általában a nyomásos infiltrálással lehet elérni. Ellentmondás látszik azonban a nyomásos infiltrálás paramétereinek hatására vonatkozóan, különös tekintettel az infiltrálási időtartam hatásának matematikai leírására a rövid infiltrálási idők tartományában. Ebben a kérdésben csaknem az az egyetlen közös álláspont, hogy a bonyolult rendszerek miatt az elméleti fizikokémiai modellezés helyett a mérés a legbiztosabb eljárás. Ezt a jelenséget igyekezett részleteiben is megvizsgálni a szerző [34, 35] cikkeiben.

A szintaktikus fémhabok sík lapok közötti kvázi-staktikus zömítését tekintve a szakirodalomban konszenzus látszik a különböző paraméterek hatását tekintve, köszönhetően a terület szabványosításának is [5, 6]. A kutatócsoportok vizsgálták a gömbhéjak méretének hatását (a kisebb gömbhéjak nagyobb nyomószilárdságot biztosítanak), a mátrixanyagok minőségének hatását, és a gömbhéjak térkitöltésének hatását is. A szilárdsági szempontból optimális szerkezetű szintaktikus fémhabokban a mátrixanyag folyási szilárdsága és a gömbhéjak törési szilárdsága megegyezik. Ugyancsak megegyezik abban a szakirodalom, hogy a szintaktikus fémhabok mechanikai

tulajdonságai (például a nyomó-, és platószilárdság, vagy a mechanikai energiaelnyelő képesség) sokkal kedvezőbbek a „hagyományos” fémhabok tulajdonságaihoz hasonlítva. Habár a radiális irányban gátolt alakváltozású nyomóvizsgálatok kevésbé elterjedtek a szakirodalomban, a kevés eredmény hasonló trendeket mutat, és hasonlatos hatásokat talál a sík lapok közötti zömítésnél tapasztaltakhoz. Jelentős eltérés leginkább a tönkremeneteli módban jelentkezett.

A növelt alakváltozási sebességű zömítés tekintetében a kutatócsoportok véleménye általában megegyezik abban, hogy a növelt alakváltozási sebességhez megnövekedett mechanikai energiaelnyelés táru, ugyanakkor rendkívül ellentmondások az eredmények az alakváltozási sebesség nyomószilárdságra gyakorolt hatását illetően. Ennek oka a kevésbé kiforrott vizsgálati technikában és az erősen eltérő vizsgálati körülményekben (alakváltozási sebesség tartomány, próbatestgeometria, a terhelőgép tulajdonságai stb.) keresendő.

A fémhabok fárasztóvizsgálatát tekintve nagyon korlátozott mennyiségű információ áll rendelkezésre a szakirodalomban. Ez részben a vizsgálatok időigényességének és műszaki követelményeinek (az átlagosnál kifinomultabb mérés technika) tudható be. A mérési eredményeket tekintve a szakirodalom egységes a fáradásos tönkremenetel lefutását illetően, miszerint a teljes folyamat három fő részre bontható, amelyek közül a legfontosabb szakasz a második, amely során az alakváltozási sebesség nagyon kicsi és az alakváltozás csaknem változatlan. Ez a szakasz testi ki a próbatest élettartamának legnagyobb részét.

7. Nyitott kérdések, kutatási területek

A fémhabok és így a szintaktikus fémhabok alapvető terhelési módja a nyomás, ezért a szakirodalomban közölt kutatások is főleg erre a területre, illetve ehhez kapcsolható kiegészítő területekre fókuszál. Ugyanakkor a szintaktikus fémhabok „hagyományos” fémhabokhoz viszonyított jóval nagyobb mechanikai és fajlagos mechanikai tulajdonságai egyedülálló lehetőséget teremtenek a szintaktikus fémhabok szerkezeti elemekként történő alkalmazására. A szerkezeti elemek ugyanakkor geometriai inhomogenitásokat tartalmaz(hat)nak, így nagy jelentősége van a szintaktikus fémhabok repedésérzékenység vizsgálatának, amelyen a szerző és kutatócsoportja jelenleg is dolgozik.

Ugyancsak kiemelt jelentőségű, de kevésbé kutatott

terület a gömbhéjak és a mátrixanyag közötti kapcsolat természete és tulajdonságai. Ez lényegében a gömbhéjak és a mátrixanyag közötti átmeneti réteg mikroszerkezeti és mechanikai vizsgálatát jelenti, amely nem egyszerű probléma. Ugyanakkor ennek a területnek kiemelt jelentősége van a szintaktikus fémhabok rugalmasságtani paramétereinek elméleti és kísérleti meghatározásában, a szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságainak leírásában és a szintaktikus fémhabok vége-selemes (vagy más numerikus) modellezésében.

Hivatkozásjegyzék

- [1] Ashby MF. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3rd edition. Elsevier Butterworth-Heinemann (2005) p 29.
- [2] EnviroSpheres Ltd. <http://www.envirospheres.com/products.asp>.
- [3] Hollomet GmbH <http://www.hollomet.com/home.html>.
- [4] Deep Springs Technology http://teamdst.com/pdf/HollowShells_MTG119-A%20Web.pdf.
- [5] DIN 50134 Testing of metallic materials - Compression test of metallic cellular materials (2008).
- [6] ISO 13314 Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular materials (2011).
- [7] Gupta N, Rohatgi PK. *Metal Matrix Syntactic Foams*. DEStech Publications Inc. (2014)
- [8] AluInvent ZRt. <http://www.aluinvent.com/>.
- [9] Neville BP, Rabiei A. Composite metal foams processed through powder metallurgy. *Materials & Design* 29 (2008) 388-396.
- [10] Rabiei A, Vendra LJ. A comparison of composite metal foam's properties and other comparable metal foams. *Materials Letters* 63 (2009) 533-536.
- [11] Vendra L, Neville B, Rabiei A. Fatigue in aluminum-steel and steel-steel composite foams. *Materials Science and Engineering A* 517 (2009) 146-153.
- [12] Rabiei A, Garcia-Avila M. Effect of various parameters on properties of composite steel foams under variety of loading rates. *Materials Science and Engineering A* 564 (2013) 539-547.
- [13] Weise J, Salk N, Jehring U, Baumeister J, Lehmus D, Bayoumi MA. Influence of Powder Size on Production Parameters and Properties of Syntactic Invar Foams Produced by Means of Metal Powder Injection Moulding. *Advanced Engineering Materials* 15 (2013) 118-122.
- [14] Peroni L, Scapin M, Fichera C, Lehmus D, Weise J, Baumeister J, Avalle M. Investigation of the mechanical

- behaviour of AISI 316L stainless steel syntactic foams at different strain-rates. *Composites Part B* 66 (2014) 430-442.
- [15] Xue X, Wang L, Wang M, Lu W, Zhang D. Manufacturing, compressive behaviour and elastic modulus of Ti matrix syntactic foam fabricated by powder metallurgy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22 (2012) 188-192.
- [16] Xue X, Zhao Y. Ti matrix syntactic foam fabricated by powder metallurgy: particle breakage and elastic modulus. *JOM* 63 (2011) 43-47.
- [17] Mondal DP, Majumder JD, Jha N, Badkul A, Das S, Patel A, Gupta G. Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route. *Materials & Design* 34 (2012) 82-89.
- [18] Daoud A. Synthesis and characterization of novel ZnAl₂₂ syntactic foam composites via casting. *Materials Science and Engineering A* 488 (2008) 281-295.
- [19] Daoud A. Effect of strain rate on compressive properties of novel Zn₁₂Al based composite foams containing hybrid pores. *Materials Science and Engineering A* 525 (2009) 7-17.
- [20] Daoud A, Abou El-Khair MT, Abdel-Aziz M, Rohatgi P. Fabrication, microstructure and compressive behavior of ZC63 Mg-microballoon foam composites. *Composites Science and Technology* 67 (2007) 1842-1853.
- [21] Jha N, Badkul A, Mondal DP, Das S, Singh M. Sliding wear behaviour of aluminum syntactic foam: A comparison with Al-10 wt% SiC composites. *Tribology International* 44 (2011) 220-231.
- [22] Mondal DP, Das S, Jha N. Dry sliding wear behaviour of aluminum syntactic foam. *Materials & Design* 30 (2009) 2563-2568.
- [23] Mondal DP, Das S, Ramakrishnan N, Uday Bhasker K. Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique. *Composites Part A* 40 (2009) 279-288.
- [24] Mondal DP, Jha N, Badkul A, Das S, Khedle R. High temperature compressive deformation behaviour of aluminum syntactic foam. *Materials Science and Engineering A* 534 (2012) 521-529.
- [25] Ramachandra M, Radhakrishna K. Effect of reinforcement of flyash on sliding wear, slurry erosive wear and corrosive behavior of aluminium matrix composite. *Wear* 262 (2007) 1450-1462.
- [26] Ramachandra M, Radhakrishna K. Synthesis-microstructure-mechanical properties-wear and corrosion behavior of an Al-Si (12%)-Flyash metal matrix composite. *Journal of Materials Science* 40 (2005) 5989-5997.
- [27] Trumble KP. Spontaneous infiltration of non-cylindrical porosity: Close-packed spheres. *Acta Materialia* 46 (1998) 2363-2367.
- [28] Rabiei A, O'Neill AT. A study on processing of a composite metal foam via casting. *Materials Science and Engineering A* 404 (2005) 159-164.
- [29] Vendra LJ, Rabiei A. A study on aluminum-steel composite metal foam processed by casting. *Materials Science and Engineering A* 465 (2007) 59-67.
- [30] Castro G, Nutt SR. Synthesis of syntactic steel foam using gravity-fed infiltration. *Materials Science and Engineering A* 553 (2012) 89-95.
- [31] Rohatgi PK, Guo RQ, Iksan H, Borchelt EJ, Asthana R. Pressure infiltration technique for synthesis of aluminum-fly ash particulate composite. *Materials Science and Engineering A* 244 (1998) 22-30.
- [32] Rohatgi PK, Gupta N, Alaraj S. Thermal expansion of aluminum-fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique. *Journal of Composite Materials* 40 (2006) 1163-1174.
- [33] Palmer RA, Gao K, Doan TM, Green L, Cavallaro G. Pressure infiltrated syntactic foams—Process development and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A* 464 (2007) 85-92.
- [34] Orbulov IN. Syntactic foams produced by pressure infiltration—the effect of pressure and time on infiltration length. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 55 (2011) 21-27.
- [35] Orbulov IN. Metal matrix syntactic foams produced by pressure infiltration—The effect of infiltration parameters. *Materials Science and Engineering A* 583 (2013) 11-19.
- [36] Orbulov IN, Dobránszky J. Producing metal matrix syntactic foams by pressure infiltration. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 52 (2008) 35-42.
- [37] Orbulov IN, Ginzler J, Kun P. Infiltration characteristics and compressive behaviour of metal matrix syntactic foams. *Materials Science Forum* 729 (2013) 68-73.
- [38] Orbulov IN, Németh Á, Dobránszky J. Composite production by pressure infiltration. *Materials Science Forum* 589 (2008) 137-142..
- [39] Zhang LP, Zhao YY. Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting. *Journal of Composite Materials* 41 (2007) 2105-2117.
- [40] Castro G, Nutt SR. Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration. *Materials Science and Engineering A* 535 (2012) 274-280.
- [41] Asthana R, Rohatgi PK, Tewari SN. Infiltration processing

- of metal - matrix composites. *Processing of Advanced Materials*. 2 (1992) 1-17.
- [42] Garcia-Cordovilla C, Louis E, Narciso J. Pressure infiltration of packed ceramic particulates by liquid metals. *Acta Materialia* 47 (1999) 4461-4479.
- [43] Washburn EW. The dynamics of capillary flow. *Physical Review* 17 (1921) 273-283.
- [44] Semlak KA, Rhines FN. The Rate of Infiltration of Metals. *Transactions of The Metallurgical Society of AIME* (1958) 325-331.
- [45] Kaptay G. Interfacial aspects to produce particulate reinforced metal matrix composites. In TMS 2001 fall meeting, Indianapolis, Indiana, USA (2001) 71-99.
- [46] Bérczy T, Kaptay G. Modeling the infiltration of liquid metals into porous ceramics. *Materials Science Forum* 473-474 (2005) 297-302.
- [47] Kaptay G. The threshold pressure of infiltration into fibrous preforms normal to the fibers' axes. *Composites Science and Technology* 68 (2008) 228-237.
- [48] Kevorkijan VM. The reactive infiltration of porous ceramic media by a molten aluminum alloy. *Composites Science and Technology* 59 (1999) 683-686.
- [49] Eustathopoulos N, Drevet B, Muolo ML. The oxygen-wetting transition in metal/oxide systems. *Materials Science and Engineering A* 300 (2001) 34-40.
- [50] Muscat D, Drew RAL. Modeling the infiltration kinetics of molten aluminum into porous titanium carbide. *Metallurgical and Materials Transactions A* 25 (1994) 2357-2370.
- [51] Balch DK, Dunand DC. Load partitioning in aluminum syntactic foams containing ceramic microspheres. *Acta Materialia* 54 (2006) 1501-1511.
- [52] Balch DK, O'Dwyer JG, Davis GR, Cady CM, Gray III GT, Dunand DC. Plasticity and damage in aluminum syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions. *Materials Science and Engineering A* 391 (2005) 408-417.
- [53] Dou ZY, Jiang LT, Wu GH, Zhang Q, Xiu ZY, Chen GQ. High strain rate compression of cenosphere-pure aluminum syntactic foams. *Scripta Materialia* 57 (2007) 945-948.
- [54] Goel MD, Peroni M, Solomos G, Mondal DP, Matsagar VA, Gupta AK, Larcher M, Marburg S. Dynamic compression behavior of cenosphere aluminum alloy syntactic foam. *Materials & Design* 42 (2012) 418-423.
- [55] Goel MD, Mondal DP, Yadav MS, Gupta SK. Effect of strain rate and relative density on compressive deformation behavior of aluminum cenosphere syntactic foam. *Materials Science and Engineering A* 590 (2014) 406-415.
- [56] Peroni L, Scapin M, Avalle M, Weise J, Lehmkus D. Dynamic mechanical behavior of syntactic iron foams with glass microspheres. *Materials Science and Engineering A* 552 (2012) 364-375.
- [57] Lehmkus D, Weise J, Baumeister J, Peroni L, Scapin M, Fichera C, Avalle M, Busse M. Quasi-static and Dynamic Mechanical Performance of Glass Microsphere- and Cenosphere-based 316L Syntactic Foams. *Procedia Materials Science* 4 (2014) 383-387.
- [58] Luong DD, Gupta N, Daoud A, Rohatgi PK. High strain rate compressive characterization of aluminum alloy/fly ash cenosphere composites. *JOM* 63 (2011) 53-56.
- [59] Luong DD, Gupta N, Rohatgi PK. The high strain rate compressive response of Mg-Al alloy/fly Ash cenosphere composites. *JOM* 63 (2011) 48-52.
- [60] Anantharaman H, Shunmugasamy VC, Strbik III OM, Gupta N, Cho K. Dynamic properties of silicon carbide hollow particle filled magnesium alloy (AZ91D) matrix syntactic foams. *International Journal of Impact Engineering* 82 (2015) 14-24.
- [61] Ferguson JB, Santa Maria JA, Schultz BF, Rohatgi PK. Al-Al2O3 syntactic foams—Part II: Predicting mechanical properties of metal matrix syntactic foams reinforced with ceramic spheres. *Materials Science and Engineering A* 582 (2013) 423-432.
- [62] Santa Maria JA, Schultz BF, Ferguson JB, Gupta N, Rohatgi PK. Effect of hollow sphere size and size distribution on the quasi-static and high strain rate compressive properties of Al-A380-Al2O3 syntactic foams. *Journal of Materials Science* 49 (2014) 1267-1278.
- [63] Santa Maria JA, Schultz BF, Ferguson JB, Rohatgi PK. 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.
- [64] Tao XF, Zhao YY. Compressive behavior of Al matrix syntactic foams toughened with Al particles. *Scripta Materialia* 61 (2009) 461-464.
- [65] Tao XF, Zhao YY. Compressive failure of Al alloy matrix syntactic foams manufactured by melt infiltration. *Materials Science and Engineering A* 549 (2012) 228-232.
- [66] Wu GH, Dou ZY, Sun DL, Jiang LT, Ding BS, He BF. Compression behaviors of cenosphere-pure aluminum syntactic foams. *Scripta Materialia* 56 (2007) 221-224.
- [67] Zou LC, Zhang Q, Pang BJ, Wu GH, Jiang LT, Su H. Dynamic compressive behavior of aluminum matrix syntactic foam and its multilayer structure. *Materials & Design* 45 (2013)

- 555-560.
- [68] Fiedler T, Taherishargh M, Krstulović-Opara L, Vesjenjak M. Dynamic compressive loading of expanded perlite/aluminum syntactic foam. *Materials Science and Engineering A* 626 (2015) 296-304.
- [69] Taherishargh M, Belova IV, Murch GE, Fiedler T. Low-density expanded perlite–aluminium syntactic foam. *Materials Science and Engineering A* 604 (2014) 127-134.
- [70] Taherishargh M, Belova IV, Murch GE, Fiedler T. On the mechanical properties of heat-treated expanded perlite–aluminium syntactic foam. *Materials & Design* 63 (2014) 375-383.
- [71] Taherishargh M, Sulong MA, Belova IV, Murch GE, Fiedler T. On the particle size effect in expanded perlite aluminium syntactic foam. *Materials & Design* 66 (2015) 294-303.
- [72] Orbulov IN. Compressive properties of aluminium matrix syntactic foams. *Materials Science and Engineering A* 555 (2012) 52-56.
- [73] Orbulov IN. Effect of matrix alloying and hollow sphere size on the compressive properties of metal matrix syntactic foams. In *International Conference on Cellular Materials*, Dresden, Germany (2012) 1-5.
- [74] Orbulov IN, Ginzler J. Compressive behaviour of metal matrix syntactic foams. *Acta Polytechnica Hungarica* 9 (2012) 43-56.
- [75] Szlancsik A, Katona B, Bobor K, Májlinger K, Orbulov IN. Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres. *Materials & Design* 83 (2015) 230-237.
- [76] Szlancsik A, Katona B, Májlinger K, Orbulov IN. Compressive Behavior and Microstructural Characteristics of Iron Hollow Sphere Filled Aluminum Matrix Syntactic Foams. *Materials* 8 (2015) 7926-7937.
- [77] Orbulov IN, Ginzler J. Compressive characteristics of metal matrix syntactic foams. *Composites Part A* 43 (2012) 553-561.
- [78] Kun P, Orbulov IN. AlCu5 és AlMgSi1 mátrixú szintaktikus fémhabok előállítás és vizsgálata. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 144 (2011) 51-55.
- [79] Myers K, Katona B, Cortes P, Orbulov IN. Quasi-static and high strain rate response of aluminum matrix syntactic foams under compression. *Composites Part A* 79 (2015) 82-91.
- [80] Bálint K, Orbulov IN. Kerámiagömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok kvázisztatikus és nagy alakváltozási sebességű nyomóvizsgálata. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 149 (2016) 30-35.
- [81] Huang Z, Yu S, Li M. Microstructures and compressive properties of AZ91D/fly-ash cenospheres composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20 (2010) 458-462.
- [82] Huang Z, Yu S, Liu J, Zhu X. Microstructure and mechanical properties of in situ Mg2Si/AZ91D composites through incorporating fly ash cenospheres. *Materials & Design* 32 (2011) 4714-4719.
- [83] Rohatgi PK, Daoud A, Schultz BF, Puri T. Microstructure and mechanical behavior of die casting AZ91D-Fly ash cenosphere composites. *Composites Part A* 40 (2009) 883-896.
- [84] Rohatgi PK, Gupta N, Schultz BF, Luong DD. The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams. *JOM* 63 (2011) 36-42.
- [85] Peroni L, Scapin M, Avalle M, Weise J, Lehnhus D. Dynamic mechanical behavior of syntactic iron foams with glass microspheres. *Materials Science and Engineering A* 552 (2012) 364-375.
- [86] Peroni L, Scapin M, Avalle M, Weise J, Lehnhus D, Baumeister J, Busse M. Syntactic Iron Foams - On Deformation Mechanisms and Strain-Rate Dependence of Compressive Properties. *Advanced Engineering Materials* 14 (2012) 909-918.
- [87] Castro G, Nutt SR, Wenchen X. Compression and low-velocity impact behavior of aluminum syntactic foam. *Materials Science and Engineering A* 578 (2013) 222-229.
- [88] Zhang L, Ma J. Processing and characterization of syntactic carbon foams containing hollow carbon microspheres. *Carbon* 47 (2009) 1451-1456.
- [89] Tao XF, Zhang LP, Zhao YY. Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres. *Materials & Design* 30 (2009) 2732-2736.
- [90] Xia X, Chen X, Zhang Z, Chen X, Zhao W, Liao B, Hur B. Compressive properties of closed-cell aluminum foams with different contents of ceramic microspheres. *Materials & Design* 56 (2014) 353-358.
- [91] Bozóki B, Májlinger K. Alumínium mátrixú hibrid kompozitok kopási tulajdonságainak vizsgálata. In *XXII. Nemzetközi Gépész Találkozó, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Nagyszeben, Románia* (2014) 62-65.
- [92] Májlinger K. Hibrid szintaktikus fémhabok kopási tulajdonságai. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 148 (2015) 33-37.
- [93] Májlinger K, Bozóki B, Kalácska G, Keresztes R, Zsidai L. Tribological properties of hybrid aluminum matrix syntactic foams. *Tribology International* 99 (2016) 211-223.
- [94] Májlinger K. Wear properties of hybrid AlSi12 matrix

- syntactic foams. *International Journal of Materials Research* 106 (2015) 1165-1173.
- [95] Májlinger K, Kalácska G, Orbulov IN, Zsidai L, Bozóki B, Keresztes R. Global Approach of Tribomechanical Development of Hybrid Aluminium Matrix Syntactic Foams. *Tribology Letters* 65 (2016) 1-13.
- [96] Májlinger K, Orbulov IN. Characteristic compressive properties of hybrid metal matrix syntactic foams. *Materials Science and Engineering A* 606 (2014) 248-256.
- [97] Májlinger K, Orbulov IN. Hibrid szintaktikus fémhabok szilárdsági jellemzői. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 147 (2014) 29-34.
- [98] Luong DD, Strbik III OM, Hammond VH, Gupta N, Cho K. Development of high performance lightweight aluminum alloy/SiC hollow sphere syntactic foams and compressive characterization at quasi-static and high strain rates. *Journal of Alloys and Compounds* 550 (2013) 412-422.
- [99] Cox J, Luong DD, Shunmugasamy VC, Gupta N, Strbik III OM, Cho K. Dynamic and Thermal Properties of Aluminum Alloy A356/Silicon Carbide Hollow Particle Syntactic Foams. *Metals* 4 (2014) 530-548.
- [100] Goel MD, Matsagar VA, Gupta AK, Marburg S. Strain rate sensitivity of closed cell aluminium fly ash foam. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23 (2013) 1080-1089.
- [101] Mondal DP, Goel MD, Das S. Effect of strain rate and relative density on compressive deformation behaviour of closed cell aluminum–fly ash composite foam. *Materials & Design* 30 (2009) 1268-1274.
- [102] Mondal DP, Goel MD, Das S. Compressive deformation and energy absorption characteristics of closed cell aluminum-fly ash particle composite foam. *Materials Science and Engineering A* 507 (2009) 102-109.
- [103] Alvandi-Tabrizi Y, Whisler DA, Kim H, Rabiei A. High strain rate behavior of composite metal foams. *Materials Science and Engineering A* 631 (2015) 248-257.
- [104] Alvandi-Tabrizi Y, Rabiei A. Use of Composite Metal Foam for Improving Absorption of Collision Forces. *Procedia Materials Science* 4 (2014) 377-382.
- [105] Kiser M, He MY, Zok FW. The mechanical response of ceramic microballoon reinforced aluminum matrix composites under compressive loading. *Acta Materialia* 47 (1999) 2685-2694.
- [106] Orbulov IN, Májlinger K. Compressive Properties of Metal Matrix Syntactic Foams in Free and Constrained Compression. *JOM* 66 (2014) 882-891.
- [107] Ashby MF, Evans T, Fleck NA, Hutchinson JW, Wadley HNG, Gibson LJ. *Metal Foams: A Design Guide*. Butterworth-Heinemann (2000).
- [108] Degischer HP, Kriszt B. *Handbook of cellular metals: production, processing, applications*. Wiley-VCH (2002).
- [109] Soubielle S, Salvo L, Diologent F, Mortensen A. Fatigue and cyclic creep of replicated microcellular aluminium. *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 2657-2663.
- [110] Amsterdam E, De Hosson JTM, Onck PR. Failure mechanisms of closed-cell aluminum foam under monotonic and cyclic loading. *Acta Materialia* 54 (2006) 4465-4472.
- [111] Harte AM, Fleck NA, Ashby MF. Fatigue failure of an open cell and a closed cell aluminium alloy foam. *Acta Materialia* 47 (1999) 2511-2524.
- [112] McCullough KYG, Fleck NA, Ashby MF. The stress–life fatigue behaviour of aluminium alloy foams. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 23 (2000) 199-208.
- [113] Banhart J, Brinkers W. Fatigue Behavior of Aluminum Foams. *Journal of Materials Science Letters* 18 (1999) 617-619.
- [114] Sugimura Y, Rabiei A, Evans AG, Harte AM, Fleck NA. Compression fatigue of a cellular Al alloy. *Materials Science and Engineering A* 269 (1999) 38-48.
- [115] Zhou J, Gao M, Cuitino AM, Soboyejo WO. Fatigue of As-Fabricated Open Cell Aluminum Foams. *Journal of Engineering Materials and Technology* 127 (2005) 40-45.
- [116] Zhou J, Soboyejo WO. Compression–compression fatigue of open cell aluminum foams: macro-/micro- mechanisms and the effects of heat treatment. *Materials Science and Engineering A* 369 (2004) 23-35.
- [117] Lehmhus D, Marschner C, Banhart J, Bomas H. Influence of heat treatment on compression fatigue of aluminium foams. *Journal of Materials Science* 37 (2002) 3447-3451.
- [118] Lin J, Zhang Y, Ma M. Preparation of porous Ti35Nb alloy and its mechanical properties under monotonic and cyclic loading. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20 (2010) 390-394.
- [119] Hakamada M, Kuromura T, Chino Y, Yamada Y, Chen Y, Kusuda H, Mabuchi M. Monotonic and cyclic compressive properties of porous aluminum fabricated by spacer method. *Materials Science and Engineering A* 459 (2007) 286-293.
- [120] Zettl B, Mayer H, Stanzl-Tschegg SE. Fatigue properties of Al–1Mg–0.6Si foam at low and ultrasonic frequencies. *International Journal of Fatigue* 23 (2001) 565-573.
- [121] Zettl B, Mayer H, Stanzl-Tschegg SE, Degischer HP. Fatigue properties of aluminium foams at high numbers of cycles. *Materials Science and Engineering A* 292 (2000) 1-7.
- [122] Rabiei A, Hutchinson JW, Evans AG. Heat generation during the fatigue of a cellular Al alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A* 31 (2000) 1129-1136.
- [123] Kim A, Kim I. Effect of specimen aspect ratio on fatigue life of closed cell Al-Si-Ca alloy foam. *Acta Mechanica Solida Sinica* 21 (2008) 354-358.
- [124] Kolluri M, Mukherjee M, Garcia-Moreno F, Banhart J, Ramamurty U. Fatigue of a laterally constrained closed cell aluminum foam. *Acta Materialia* 56 (2008) 1114-1125.

- [125] Olurin OB, McCollough KYG, Fleck NA, Ashby MF. Fatigue crack propagation in aluminium alloy foams. *International Journal of Fatigue* 23 (2001) 375-382.
- [126] Motz C, Friedl O, Pippan R. Fatigue crack propagation in cellular metals. *International Journal of Fatigue* 27 (2005) 1571-1581.
- [127] Harte AM, Fleck NA, Ashby MF. The fatigue strength of sandwich beams with an aluminium alloy foam core. *International Journal of Fatigue* 23 (2001) 499-507.
- [128] Schultz O, des Ligneris A, Haider O, Starke P. Fatigue Behavior, Strength, and Failure of Aluminum Foam. *Advanced Engineering Materials* 2 (2000) 215-218.
- [129] Caty O, Maire E, Douillard T, bertino P, Dejaeger R, Bouchet R. Experimental determination of the macroscopic fatigue properties of metal hollow sphere structures. *Materials Letters* 63 (2009) 1131-1134.
- [130] Taherishargh M, Katona B, Fiedler T, Orbulov IN. Fatigue properties of expanded perlite/aluminum syntactic foams. *Journal of Composite Materials* (2016), elérhető online, megjelenés alatt.
- [131] Orbulov IN, Katona B, Szabó G. Fatigue properties of metal matrix syntactic foams. In *International Conference on Cellular Materials, Dresden, Germany* (2014) 1-6.
- [132] Katona B, Szabó G, Orbulov IN. Fémhátrixú szintaktikus fémhabok fáradási tulajdonságai. *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 148 (2015) 30-33.
- [133] Katona B, Szabó G, Orbulov IN. Fatigue properties of ceramic hollow sphere filled aluminium matrix syntactic foams. *Materials Science and Engineering A* 679 (2017) 350-357.

TM4000Plus

Tabletop Microscope

HITACHI

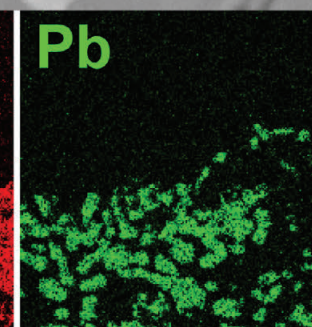
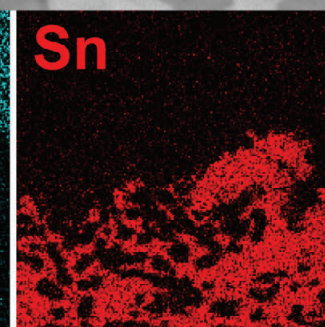
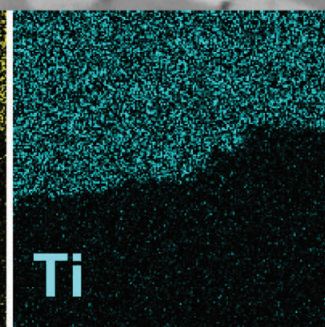
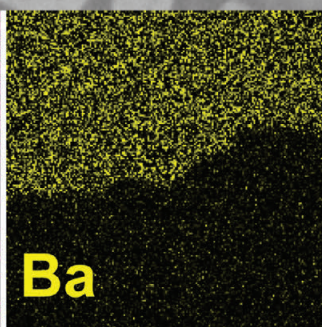
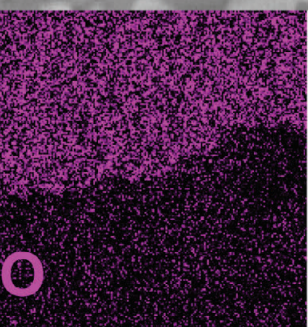
Inspire the Next



„Ez a világ legnépszerűbb asztali elektronmikroszkópja, sokan csak az anyagtudósok svájci bicskájának tartják!”

(Koichi Satusho)

Élményszerű használat, csúcsminőségű detektorok kompakt kivitelben, elérhető áron!



UNICAM
Magyarország Kft.

1144 Budapest, Kőszeg u. 27.

E-mail: unicam@unicam.hu

Web: www.unicam.hu

Tel.: 06-30-255-9644