

Szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságainak becslése és mérése

Measurement and estimation of mechanical properties of metal matrix syntactic foams

SZLANCSIK Attila^{1,a}, DOMBÓVÁRI Zoltán^{2,b}, KATONA Bálint^{1,c}, ORBULOV Imre Norbert^{1,3,d}

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Anyagtudomány és Technológia Tanszék
1111, Budapest, Műegyetem rakpart 3. MT épület

Tel.+36 1 463 1115, Fax: +36 1 463 1366, www.att.bme.hu

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Műszaki Mechanikai Tanszék

1111, Budapest, Műegyetem rakpart 5. MM épület

Tel.+36 1 463 1369, Fax: +36 1 463 3471, www.mm.bme.hu

³MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

1111, Budapest, Műegyetem rakpart 3.

E-mail: ^aszlancsik@eik.bme.hu, ^bdombovari@mm.bme.hu, ^ckatona@eik.bme.hu, ^dorbulov@eik.bme.hu

Abstract

Aluminum matrix syntactic foams reinforced with iron and ceramic hollow spheres were investigated by compression tests. A theoretical equation was developed to predict the flow curve. In this equation the parameters depend only on the material properties of the matrix, the filler material, and the filler volume fraction. The effective Young's modulus was measured by modal analysis, and the results were compared with analytical predictions and finite element analysis results.

Összefoglaló

Alumínium mátrixú, vas illetve kerámia gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságait vizsgáltuk. A mérések alapján a vas gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabokra egy elméleti nyomógörbét dolgoztunk ki, amelynek paraméterei csak a mátrix-, és az erősítőanyag tulajdonságaitól, valamint a szerkezeti tulajdonságoktól függenek. A szintaktikus fémhabok effektív rugalmassági modulusát kísérleti modális analízis segítségével határoztuk meg, amit összehasonlítottuk az analitikus rugalmasságtani modellek, valamint végeleemes szimulációk eredményeivel.

Kulcsszavak: Alumínium mátrixú kompozit, szintaktikus fémhab, effektív rugalmassági modulusz.

1. BEVEZETÉS

A folyamatos fejlődés egyik záloga, hogy az energiafelhasználás egyre hatékonyabb legyen. Az anyagfejlesztésen belül két út mutatkozik az jobb energiahatékonyságú alkatrészek előállítására: (i) a terhelés fő irányában, vagy irányokban növelik az anyag teherviselő képességét vagy (ii) a tömegcsökkentés oly módon, hogy a fajlagos tulajdonságok növekedjenek. Az első esetre a különféle kompozitok, míg a második esetre a habok nyújthatnak megoldást. A két megoldás ötvözeteként jöttek létre az úgynevezett szintaktikus fémhabok, ahol a porozitást előre gyártott üreges gömbhéjakkal hozzák létre. Kiemelkedőek a fajlagos tulajdonságaik, különösképpen az energiaelnyelő képességük [1].

A szintaktikus fémhabok előállítására kétféle módszer terjedt el: (i) a bekeveréses eljárás, valamint (ii) a nyomásos infiltrálás, ahol a gyártási viszonyok miatt, csak a maximális térkitöltéshez közeli térkitöltésű fémhab gyártható [2-4].

A fémhabok a kiváló energiaelnyelő képességük miatt elsősorban nyomó igénybevételnek vannak kitéve. Legfontosabb jellemzőik a nyomószilárdság, és az energiaelnyelő képesség. A szakirodalomban

széles körben tanulmányozták a szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságait [5-7] és kopási tulajdonságait [8-9], ellenben a teljes nyomógörbe becslésével még nem próbálkozott senki, így az adott alakváltozásig elnyelt mechanikai munkára sincsenek becslő eljárások.

A fémhabok effektív rugalmassági modulusának (E_{eff} , a szintaktikus fémhabot helyettesítő, képzeletbeli, homogén és izotróp test rugalmassági modulusza) vizsgálata különösen érdekes, mivel ezzel új utak nyílhatnak meg a fémhabok felhasználási területei előtt. Amennyiben a szerkezeti merevség meghatározhatóvá válik, úgy szerkezeti anyagként is elindulhat a szintaktikus fémhabok elterjedése [10].

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS A MÉRŐBERENDEZÉSEK

A kutatásunk két fő részre bontható: a vas gömbhéj (Globomet) erősítésű szintaktikus fémhabok esetén egy olyan egyenlet kidolgozása, amely a teljes nyomógörbét leírja, valamint a kerámia gömbhéj (Globocer) erősítésű fémhabok esetén pedig az effektív rugalmassági modulusz meghatározása.

2.1. Nyomógörbe egyenlet becslése

Az egyenlet meghatározásához először mérési adatokra volt szükség [11]. Többféle alumínium mátrixanyaggal (Al99,5; AlSi12; AlCu5 és AlMgSi1) gyártott fémhabot vizsgáltunk. A kiválasztott keményíthetőket (AlCu5 és AlMgSi1) oldott (O) valamint öregített (T6) állapotban is megvizsgáltuk. Az egyenlet kiinduló alakját az 1. egyenlet mutatja be:

$$\sigma_{f,hab} = C_1 + C_2\varepsilon + C_3\varepsilon^3 - C_4e^{(C_4\varepsilon)}. \quad (1)$$

Ahol $\sigma_{f,hab}$ a hab alakításához szükséges mérnöki feszültség, míg ε az aktuális mérnöki alakváltozás értéke. A cél az volt, hogy az egyenletben szereplő $C_1 - C_4$ konstansokat úgy határozzuk meg, hogy azok csak a mátrix-, az erősítőanyag valamint a szerkezet tulajdonságaitól függjenek. Ehhez szükségünk volt a próbatestek (14 mm átmérőjű, 14 mm magas hengeres test) 3D-s modelljére. A legnagyobb kihívást a gömbhéjak elhelyezése jelentette, hiszen a valóságban véletlenszerűen helyezkednek el. Írtunk egy programot, amely kiosztotta a gömbhéjakat úgy, hogy ne érintkezzenek egymással, de megfelelően közel legyenek egymáshoz, hogy a szükséges térkitöltést (η) elérjük. A pontosság érdekében 700 gömbhéj esetén lemért átmérő értékeket adtunk be a programnak. Ezután már meg tudtuk alkotni a 3D modellt, amit több sík mentén is elmesztettünk, majd meghatároztuk a kapott felületértékeket. Erre azért volt szükség, mert a terhelésátadásnál csak azok a felületek számítanak, ahol anyag van, tehát az üregek nem.

2.2. Effektív rugalmassági modulusz

A felhasznált anyagok ebben az esetben kerámia gömbhéjak voltak, Al99.5 és AlSi12 mátrixba ágyazva. A szabványban [12] a szerkezeti merevség meghatározására találunk módszert, ami egy adott összetételhez és egy adott szerkezetre vonatkozik, míg az effektív rugalmassági modulusz csak az anyagösszetételtől függ. Ez kifejezetten előnyös, ha szerkezeti anyagként akarjuk felhasználni a fémhabot, hiszen nem tudunk, és nem is gazdaságos minden lehetséges szerkezetet legyártani. Az effektív rugalmassági moduluszt három féle módszerrel vizsgáltuk: méréssel, analitikus modellekkel, valamint végeeselemes szimulációval. A mérés során $15 \times 25 \times 170$ mm-es hasáb próbatestet vizsgáltunk, melyet egy hosszú gumikötélre lógattunk fel, annak érdekében, hogy a mért jelből a gumikötél sajátfrekvenciája könnyedén leválasztható legyen. A gerjesztést egy modális kalapáccsal (Brüel & Kjaer type 8203) adtuk rá, majd a válaszjelet a Brüel & Kjaer type 4189 típusú mikrofonnal érzékeltük, és továbbítottuk a Brüel & Kjaer type 3050-B-060 típusú adatgyűjtőbe. Ezután egy szoftver segítségével kiértékeljük a kapott adatokat, amiből megkaptuk az első illetve a második sajátfrekvenciákat. A sajátfrekvenciákból a Timoshenko-féle rúdelmélet segítségével számoltunk vissza a rugalmassági modulusz értékére.

Három analitikus modellel is meghatároztuk az effektív rugalmassági modulusz értékét [10]. Ezek voltak az klasszikus önkonzisztens becslés (CSC), a differenciális önkonzisztens becslés (DSC), valamint a Mori – Tanaka becslés (MT). Az egyenletek megoldását szimbolikus matematikai programban végeztük.

Végeselemes szimulációnál felhasználtuk az 2.1. fejezetben megalkotott 3D-s modellt. Ezt behálóztuk, és végeselemes programban elvégeztük a modális analízist valamint zömítést is. Mind a két esetben tisztán rugalmas anyagmodellel dolgoztunk, és elhanyagoltuk a gömbhéjakat. A zömítés során, a szerszámokat merev testként szimuláltuk.

3. EREDMÉNYEK

A nyomógörbe egyenletével kapcsolatban a paraméterek meghatározásánál azt tapasztaltuk, hogy a C_1 paraméter lineáris összefüggést mutat a mátrixanyagok folyáshatárával. Ezen felül ez az érték megegyezett a fémhab folyáshatárával, abban az esetben, ha a kapott erőértékeket a tényleges felülettel osztottuk le. A C_1 paramétert a továbbiakban a hab folyáshatárának tekintve az egyenlet módosul:

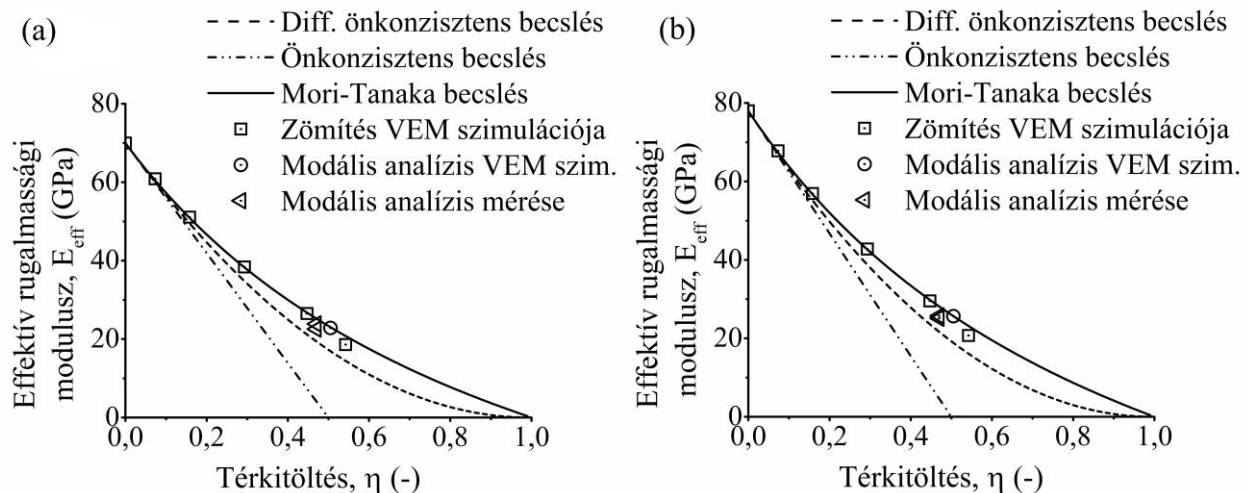
$$\sigma_{f,hab} = \sigma_{hab} + b\sigma_{mátrix}\varepsilon + 10b\sigma_{mátrix}\varepsilon^3 - \sigma_{hab}e^{(-100\varepsilon)}. \quad (2)$$

Ahol σ_{hab} a fémhab folyáshatára a tényleges felülettel számolva, $\sigma_{mátrix}$ a mátrixanyag folyáshatára, $b=0,48$ ami tényleges felület és az elméleti felület hányadosa. A becült és mért adatokat, valamint a közöttük lévő különbségeket az 1. táblázat foglalja össze. A táblázatban σ_Y a fémhab folyáshatára (elméleti felülettel számolva), σ_{plt} a platófeszültség, $W_{50\%}$ pedig az 50% alakváltozásig elnyert munka.

A mért illetve becült nyomógörbékkel meghatározható adatok és eltérések százalékosan 1. táblázat

Mátrixanyag		Al99,5	AlSi12	AlMgSi1-O	AlMgSi1-T6	AlCu5-O	AlCu5-T6
Mért	σ_Y	26	35	38	51	66	66
Becsült	(MPa)	25	41	31	52	73	68
Eltérés	%	4	17	18	2	11	3
Mért	σ_{plt}	37	58	63	83	116	111
Becsült	(MPa)	38	66	49	86	123	113
Eltérés	%	3	14	22	4	6	2
Mért	$W_{50\%}$	1867	3123	2492	4404	5563	6073
Becsült	(MJ/m ³)	1850	3189	2350	4164	5496	5940
Eltérés	%	1	2	6	6	1	2

Az effektív rugalmassági modulusz tekintetében a mérésekből, szimulációkból, valamint az analitikus számításokból kapott eredményeket közös diagramban ábrázoltam (1. ábra).



1. ábra

Az Al99.5 (a) és az AlSi12 (b) mátrixanyagú szintaktikus fémhabok E_{eff} értékei a térkitöltés függvényében

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A fent röviden ismertetett eredményeinkből a következő következtetéseket vonhatjuk le:

- Sikeresen alkottunk meg egy olyan nyomógörbe egyenletet, melynek a paraméterei csak a kiinduló anyagok adataitól valamint a térkitöltéstől függenek. Ezáltal lehetővé vált, a szerkezetek mechanikai tulajdonságainak becslése anélkül, hogy le kellett volna gyártani azokat.
- Sikeresen modelleztük a szintaktikus fémhabot a háromdimenziós térben, követve a gömbhéjak gyártásból adódó, természetes átmérőváltozását.
- A mérések, a szimulációk valamint az analitikus modellek mind alátámasztják, hogy sikeresen meghatároztuk a kerámia gömbhéj erősítésű fémhabok effektív rugalmassági moduluszát.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-16-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült (Szlanicsik Attila, Katona Bálint). A kutatási eredmények és a cikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült (Orbulov Imre Norbert, BO/00294/14). A kísérleteket a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal az NKTH-OTKA K108779 szerződés keretében támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] A. Rabiei, L. J. Vendra. A comparison of composite metal foam's properties and other comparable metal foams, *Materials Letters* 63 (2009) 533–536
- [2] P. Kun, I. N. Orbulov. AlCu5 és AlMgSi1 mátrixú szintaktikus fémhabok előállítása és vizsgálata, *Bányászati Kohászati Lapok*, 144:(3) (2011) 51-55
- [3] A. Rabiei, A. T. O'Neill. A study on processing of a composite metal foam via casting, *Materials Science and Engineering A* 404 (2005) 159–164
- [4] P.K. Rohatgi, J. K. Kim, N. Gupta, S. Alaraj, A. Daoud. Compressive characteristics of A356/fly ash cenosphere composites synthesized by pressure infiltration technique, *Composites: Part A* 37 (2006) 430–437
- [5] X.F. Tao, Y.Y. Zhao. Compressive behavior of Al matrix syntactic foams toughened with Al particles, *Scripta Materialia*, 61 (2009) 461–464
- [6] I.N. Orbulov, K. Májlinger. On the microstructure of ceramic hollow microspheres, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 54:(2) (2012) 89-94.
- [7] K. Májlinger, I.N. Orbulov. Fémmátrixú kerámia kompozitok mikroszerkezeti tulajdonságai, *Bányászati Kohászati Lapok*, 145:(5) (2012) 54-58
- [8] K. Májlinger. Wear properties of hybrid AlSi12 matrix syntactic foams, *International Journal of Materials Research* 106:(11) pp. 1165-1173.
- [9] K. Májlinger. Hibrid szintaktikus fémhabok kopási tulajdonságai, *Bányászati és Kohászati Lapok-Kohászat* 148:(1) pp. 33-37.
- [10] L. Bardella, A. Sfreddo, C. Ventura, M. Porfiri, N. Gupta, A critical evaluation of micromechanical models for syntactic foams, *Mechanics of Materials* 50 (2012) 53–69
- [11] A. Szlanicsik, B. Katona, K. Bobor, K. Májlinger, I. N. Orbulov, Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres, *Materials & Design* 83 (2015) 230–237
- [12] Mechanical testing of metals – Ductility testing – Compression test for porous and cellular metals, ISO 13314:2011