



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Anyagtudomány és Technológia Tanszék

Szlancsik Attila

okleveles gépészmérnök

Szintaktikus fémhabok rugalmas, és nyomóvizsgálatokkal meghatározható képlékeny tulajdonságai és modellezése

című doktori (PhD-) értekezésének összefoglalását bemutató

Tézisfüzet

Témavezető:
Dr. Orbulov Imre Norbert
egyetemi tanár

Budapest, 2021.

1. BEVEZETÉS

A tézisfüzetben ismertetem a doktori értekezésem teljes egészének legfontosabb tartalmi részleteit. Ez az összegzés egyaránt vonatkozik a szakirodalom-kutatási eredményeimre, a tudományos kutatómunkám célkitűzéseire, az ezekből következően meghatározott kutatási feladataim leírására és értékelésére. Ebben a tézisfüzetben, a doktori értekezések formai követelményeinek megfelelően egységes, önmagában is érthető rendszerben mutatom be a kutatási eredményeimet.

Ebben az összegzésben kívánom bevezetni, magyarázni és indokolni, valamint érvényességi tartományukban körülhatárolni a tudományos kutatómunkám önálló kezdeményezésként tekinthető, tételes, tézispontokban megfogalmazott eredményeit is. Ez a tézisfüzet-szerkezet lehetővé teszi a tézispontok egyértelmű és a lehető legrövidebb megfogalmazását.

A mai modern világban egyre nagyobb kényszer az energiahatékonyságra való törekvés. Ennek kapcsán két fontos fejlesztési irány is van az anyagok szempontjából: az egyik, hogy a terhelés fő irányában, vagy irányjaiban az anyag teherviselő képessége minél nagyobb legyen, a másik a tömegcsökkentés, amivel a fajlagos (sűrűsége fajlagosított) tulajdonságok javíthatók. Mindkét esetre a hibrid anyagok nyújthatnak hatékony megoldást.

A szintaktikus fémhabok sűrűsége kicsi, ezért fajlagos tulajdonságaik kiemelkedők, ugyanakkor a hagyományos fémhaboknál – melyekben a porozitást nem erősítőanyag, hanem valamilyen gázképző eljárással hozzuk létre – az esetek többségében sokkalta nagyobb fajlagos szilárdságúak (hagyományos fémhab: 10 MPa/(g/cm³) [1], szintaktikus fémhab: 126 MPa/(g/cm³) [2]), és a fajlagos mechanikai energiaelnyelő képességük is nagyobb (hagyományos fémhab: 1-2,5 J/g [3], szintaktikus fémhab: 12-16 J/g [4, 5]). Mivel habanyagok, ezért célszerű igénybevételük a nyomás, ennek megfelelően a nyomóvizsgálati jellemzőiket széles körben tanulmányozzák (olyannyira, hogy a vizsgálati módszert szabványosították is [6]). A makroszerkezet tekintetében az erősítőanyag térbeli eloszlása és térfogathányada a legfontosabb. A mikroszerkezet kapcsán tisztázandó kérdés a gömbhéjak és a mátrixanyag közötti kapcsolat megfelelőisége. Ez a határreteg, vagy átmeneti réteg felelős a szintaktikus fémhabokban a terhelésátadásért az erősítőanyag és a mátrix között.

A polimer mátrixú szintaktikus habokat fejlesztették ki először, főként mélytengeri alkalmazásokra. Ilyenek például a HOV Alvin vagy a REMUS 6000 merülő eszközök, amelyek akár 6500 méteres mélységig tudnak merülni [7]. A szintaktikus fémhaboknak a mélytengeri kutatásokban, az űrparban és akár az autópárban is jelentős szerepük lehet a jövőben. Napjainkban a hagyományos fémhabokat már luxus- és széria autókba is beépítik, mint például a Ferrari Spider 360 vagy Audi Q7 [8].

A szakirodalom-kutatás során olyan szakmai kérdésekre bukkantam a szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai terén, amelyekre még csak viszonylag kevés tudományos eredmény és válasz található. A következőkben ezekről a hiányosságokról és kezdeti eredményekről is említést teszek, majd a célkitűzés ismertetése után rátérek a kutatómunkám alapvető részleteinek bemutatására.

2. A SZAKIRODALOM-KUTATÁS FŐBB EREDMÉNYEI

A szintaktikus fémhabokat az 1960-as évek végén publikált [9] polimer mátrixú szintaktikus habok mintájára fejlesztették ki. Az első, szintaktikus fémhabokkal foglalkozó publikációk az 1990-es évek elején-közepén jelentek meg. A szintaktikus fémhabokkal foglalkozó tudományterület aktív, hisz alkalmazásbeli lehetőségei még 60 évvel a tudományág kialakulása után is részben kiaknázatlanok, köszönhetően annak is, hogy mint megannyi más anyag, a szintaktikus habok is a harcászati fejlesztés termékei (tengeralattjárók, radarkeresztmetszetcsökkentés, majd lövedékelyelés).

2.1. A szintaktikus fémhabok nyomószilárdsági vizsgálatai

A szintaktikus fémhabok fő alkalmazási területe az ütköző elemek, emiatt a legfontosabb tulajdonsága a mechanikai energiaelnyelés, melyet zömítéssel vizsgálatokkal lehet a legjobban meghatározni.

Anbuhezhiyan és társai [10] 9 t% alumíniummal ötvözött magnézium mátrixú üveg mikrogömbhéj erősítésű fémhabokat gyártottak. A gyártásnál 10, 15 illetve 20 tf%-nyi mikrogömbhéjat adagoltak az olvadékhoz, majd vákuum alatt a formába öntötték ezzel is elősegítve a gyártás minőségének javítását, és a mikroüregek elkerülését. A gyártás paramétereinek optimalizálásával 5%-os javulást sikerült elérniük a nyomószilárdság tekintetében. Az így kapott nyomószilárdsági érték 280 MPa volt.

Broxtermann és társai [11] 27 t% alumíniumot és 2 t% rezet tartalmazó cink mátrixú fémhabot gyártottak, duzzasztott perlit és duzzasztott üveg felhasználásával. A duzzasztott perlitese fémhab sűrűsége $2,05 \text{ g/cm}^3$, míg a duzzasztott üveg erősítésű $1,84 \text{ g/cm}^3$ lett. Ahogy várható volt, a kvázi-statikusan zömítővizsgálatokból kiderült, hogy a duzzasztott perlitel erősített fémhaboknak jobb a mechanikai tulajdonságai. A perlit és üveg erősítésű fémhabok nyomószilárdsága rendre 57 és 53 MPa, míg a platófeszültsége 67 és 57 MPa lett.

Vendra és Rabiei [12] kis karbontartalmú acél, valamint rozsdamentes acél gömbhéjakkal erősített AISI7 mátrixú szintaktikus fémhabokat gyártottak gravitációs öntéssel. Az elkészült tömbökből $35 \times 40 \times 50 \text{ mm}$ méretű hasáb próbatesteket munkáltak ki. Az így előállított mintákat kvázi-statikusan zömítették, majd meghatározták a szabványos mérőszámokat. A rozsdamentes acél gömbhéjakkal erősített fémhab minden tekintetben felülmúlta a kis karbontartalmú gömbhéjakat tartalmazó fémhabokat, miközben a sűrűségük közel megegyezett ($2,46 \text{ g/cm}^3$, valamint $2,41 \text{ g/cm}^3$). A platófeszültség 80 MPa volt a rozsdamentes acél gömbhéj esetén, míg a kis karbontartalmú acél gömbhéj alkalmazásával mindössze 58 MPa. Az 50%-os alakváltozásig elnyelt energia értékei ugyanebben a sorrendben 40 J/cm^3 , valamint 30 J/cm^3 . Összehasonlítva egy hagyományos – vagyis erősítőanyag nélküli – alumínium mátrixú fémhabbal, több mint tízszeresére nőtt az energiaelnyelő képesség, mivel például a Ruan és társai [13] által vizsgált hagyományos fémhab $2,6 \text{ J/cm}^3$ elnyelésére volt képes 50%-os alakváltozásnál.

2.2. A szintaktikus fémhabok modellezése

A szintaktikus fémhabok számítógéppel segített modellezésével csak nemrégiben kezdtek el foglalkozni. Alig néhány cikk foglalkozik zártcellás fémhabok modellezésével és végeeselemes vizsgálatával.

Bardella és társai [14] az Ansys programot használva alkották meg a modelljeiket, amikben különböző térkitöltésű fémhabokat hoztak létre. Hat különböző térkitöltést alkalmaztak, 10-60 tf% között 10 tf%-os lépésközökkel. A modellezéshez 10 csomópontú tetraéder elemeket használtak. Ők is zömítő vizsgálatot modelleztek és a nyírási

modulust határozták meg belőle. Az eredményeket a különböző analitikus számításokon alapuló elméletekkel vetették össze. Azt tapasztalták, hogy a különböző elméletek merőben eltérő eredményei között félúton található a számított értékek, valamint, hogy három elmélet eredményei közel haladtak egymáshoz, ezek voltak a Mori-Tanaka féle becslés (MT), a klasszikus önkonzisztens becslés (CSC), valamint a differenciális önkonzisztens becslés (DSC).

Nian és társai [15] munkáját azért emelem ki, mivel ők már változtatták a gömbhéjak átmérőjét is a 3D-s modellükben, tehát egy modellen belül más és más átmérőjű gömbök voltak, ami jól közelíti a valóságot (miszerint az erősítőanyag szemcsék nem tökéletesen egyformák, hanem az átmérőjük szórását mutat). Az eredményeikből megállapították, hogy az effektív rugalmassági modulusra nincs különösebb hatása az alaknak, ellenben a Poisson tényezőt csökkenti az erősítőanyag karcsúságának csökkenése.

2.3. A szintaktikus fémhabok effektív rugalmassági modulusának meghatározása mérésel

A szerkezeti merevség egy méretfüggő tulajdonság, amelyet nem lehet általánosítani más méretű próbatestekre. Ezzel szemben az effektív rugalmassági modulus – amelyet Bardella és társai [14] is meghatároztak – egy méretfüggetlen anyagtulajdonság, amely akár tervezések alapjául is szolgálhat.

Az általam vizsgált eljárás a modális analízis volt [16]. Majkut [17] a Timoshenko és az Euler-Bernoulli rúd elméleteket vizsgálta. Mindkét elmélet alkalmas a sajátfrekvenciák alapján a rugalmassági modulus meghatározására. A mérésből átszámított rugalmassági modulus értékeket végeselemes modell eredményeivel hasonlította össze, melyből megállapította, hogy a Timoshenko rúdelmélet minden esetben jó közelítést adott a szimulált eredményekre. Ezen elmélet nagy előnye, hogy úgy határozható meg belőle a vizsgált próbatest rugalmassági modulusa, hogy csak a geometriai méretekre és a sűrűsége van hozzá szükség valamint az első és a második sajátfrekvencia értékére.

2.4. Radiális irányban gátolt zömítés

A radiális irányban gátolt zömítés sok további információval szolgálhat a hagyományos síklapok közötti zömítéshez képest. A nehezebb kivitelezhetőség miatt viszont jelenleg kevés tanulmány foglalkozik ezzel a témával.

Duarte és társai [18] AlSi7 alumínium ötvözetű zártcellás fémhabot gyártottak. Szabad és gátolt zömítést végeztek. A kvázi-statisz és a dinamikus (284 mm/s) vizsgálatok között nem volt kimutatható különbség, viszont a sűrűségbeli eltérések hatására a nagyobb sűrűségű próbatestek kedvezőbb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeztek. A szabad és gátolt zömítés között lényegi különbség volt megfigyelhető, nemcsak a nyomószilárdság értéke nőtt meg, hanem a tömörödési alakváltozás is lecsökkent. Ezen felül a platós szakasz meredeksége jelentősen megnőtt.

Li és társai [19] egy nyíltcellás alumínium habot vizsgáltak szintén szabad és gátolt zömítés esetén. A szabad zömítés esetén 4,8 MPa volt a nyomószilárdság értéke, míg gátolt esetben 17,4 MPa. A platófeszültség értékében 68%-os növekedés volt megfigyelhető, 22 MPa-ról 37 MPa-ra növekedett.

A radiális irányban gátolt zömítés lehetővé teszi, hogy meghatározzam belőle egy anyagmodell paramétereit is. Shima és Oyane [20, 21] egy olyan anyagmodellt dolgoztak ki porkohászati anyagokra mely figyelembe veszi, hogy ezeknél az anyagoknál nem érvényes a térfogatállandóság, hanem csak a tömegállandóság.

3. SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK JEGYZÉKE AZ 1. ÉS 2. FEJEZETHEZ

1. Jang W-Y, Hsieh W-Y, Miao C-C, Yen Y-C, Microstructure and mechanical properties of ALPORAS closed-cell aluminium foam, *Materials Characterization* 107 (2015) 228–238
2. Orbulov IN, Szintaktikus fémhabok, PhD-értekezés, 2009
3. Shen J, Lu G, Ruan D, Compressive behaviour of closed-cell aluminium foams at high strain rates, *Composites: Part B* 41 (2010) 678–685
4. Su M, Wang H, Hao H, Fiedler T, Compressive properties of expanded glass and alumina hollowspheres hybrid reinforced aluminum matrix syntactic foams, *Journal of Alloys and Compounds* 821 (2020) 153233
5. Orbulov IN, Alumínium és alumínium ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabok gyártása és mechanikai tulajdonságai, DSc-értekezés, 2017
6. ISO13314:2011 Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular metals, 2011.
7. Engineered syntactic systems: <https://esyntactic.com/case-studies/> (2021.01.27.)
8. Dukham N, szerk. (2013): *Metal Foams: Fundamentals and Applications*, DEStech Publications, Lancaster
9. Kallas DH, Chatten CK, Buoyancy materials for deep submergence *Ocean Engineering* 4 (1969:1) 421-424
10. Anbuhezhiyan G, Muthuramalingam T, Mohan B, Effect of process parameters on mechanical properties of hollow glass microsphere reinforced magnesium alloy syntactic foams under vacuum die casting, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18 (2018) 1645 – 1650
11. Broxtermann S, Vesenjok M, Krstulovic-Opara L, Fiedler T, Quasi static and dynamic compression of zinc syntactic foams, *Journal of Alloys and Compounds* 768 (2018) 962-969
12. Vendra LJ, Rabiei A, A study on aluminum–steel composite metal foam processed by casting, *Materials Science and Engineering A* 465 (2007) 59–67
13. Ruan D, Lu G, Chen FL, Siores E, Compressive behaviour of aluminium foams at low and medium strain rates. *Compos Struct*, 57. (1-4) (2002) 331-336
14. Bardella L, Sfreddo A, Ventura C, Porfiri M, Gupta N, A critical evaluation of micromechanical models for syntactic foams, *Mechanics of Materials*, 50 (2012) 53-69
15. Nian G, Shan Y, Xu Q, Qu S, Effects of hollow particle shape and distribution on the elastic properties of syntactic foams: 3D computational modeling, *Computational Materials Science* 95 (2014) 106–112
16. Dombóvári Z, Stépán G, Marózserszámok dinamikai tulajdonságai és azok hatása a megmunkálás stabilitására, *GÉP* 63:(1) (2012) 163–174.
17. Majkut L, Free and forced vibration of Timoshenko beams described by single difference equation, *J Theor Appl Mech.* 47(1) (2009) 193–210.
18. Duarte I, Vesenjok M, Krstulovic-Opara L, Compressive behaviour of unconstrained and constrained integral-skin closed-cell aluminium foam, *Composite Structures* 154 (2016) 231–238
19. Li C, Li C, Wang Y, Compressive behavior and energy absorption capacity of unconstrained and constrained open-cell aluminum foams, *Advanced Composites Letters* 29 (2020) 1-4
20. Shima S, Oyane M, Plasticity theory for porous metals, *Int. J. Mechanical Science* 18 (1976) 285-291
21. Oyane M, Shima S, Tabata T, Consideration of basic equations, and their application, in the forming of metal powders and porous metals, *Journal of Mechanical Working Technology*, 1 (1978) 325-341

4. CÉLKITŰZÉSEK

A porózus anyagok nyomóvizsgálatára létező ISO 13314 szabvány [7] által definiált értékeket nem mindenki alkalmazza, emiatt a különböző tanulmányok összehasonlítása szinte lehetetlen. Ezek miatt a mátrixanyag hatása a szabvány által előírt értékekre nem határozható meg a szakirodalmi adatok alapján, mely a tervezés és felhasználás során fontos lenne.

A szintaktikus fémhabok modellezése szintén kulcsfontosságú a tervezés szempontjából, hiszen ezzel a lépéssel lecsökkenthető a prototípusok, illetve a próbatestek száma. A szakirodalomban jelenleg csak 5-10 gömbhéjat tartalmazó modellek érhetőek el, melyek képesek a képlékeny alakváltozás szimulálására, azonban ez nem éri el azt a méretet, amelyet a szabvány minimálisan előír, így az általuk biztosított eredmények megbízhatatlanok. A több gömbhéjat tartalmazó modellek jelenleg csak a rugalmas tulajdonságok vizsgálatára alkalmasak, azonban a rugalmas tulajdonságokat egyetlen méréssel sem lehet alátámasztani. A szakirodalomban jelenleg nem található olyan mérési eljárás, amely a szintaktikus fémhabok rugalmas tulajdonságainak mérésére alkalmas lenne, így nem lehet validálni ezeket a modelleket.

A radiális irányban gátolt zömítés egy kiaknázatlan területe a fémhab kutatásnak, pedig az energiaelnyelő, és ütköző elemeknél egy lehetséges tönkremeneteli mód vizsgálható vele.

A tervezés szempontjából kiemelkedő fontossággal bírna, ha olyan anyagmodellel rendelkeznénk a szintaktikus fémhabokról, amely lehetővé teszi a méret- és terhelésfüggetlen leírását ezeknek az anyagoknak. A szakirodalomban erre jelenleg nincs példa, így az ott meghatározott értékekről minden esetben elmondható, hogy csak az adott méretű és összetételű anyagokra igazak. A korábbi vizsgálataim és a szakirodalomkutatás alapján az alábbi célkitűzéseket tettem:

- Megvizsgálni a mátrixanyag, hőkezeltégi állapot és a próbatest méretének hatását a szintaktikus fémhabok nyomószilárdsági tulajdonságaira.
- A szintaktikus fémhabok végeselemes modellezése úgy, hogy validálni lehessen a mérésekkel, ezáltal egy olyan modell álljon a rendelkezésemre, amely már tervezések során is alkalmazható.
- A szintaktikus fémhabok effektív rugalmassági modulusának meghatározása mérési módszerrel, amely alkalmas a szakirodalomban fellelhető modellek validálására.
- Egy olyan anyagmodell validálása, amely alkalmas a szintaktikus fémhabok modellezésére, ezáltal próbatestmérettől és feszültségi állapottól függetlenül képes leírni ezeket az anyagokat.

5. A KUTATÓMUNKA MUNKASZAKASZAINAK ÁTTEKINTÉSE

A kutatómunkámat a célkitűzésekkel összhangban négy nagy témakörre osztottam, amelyek a következők:

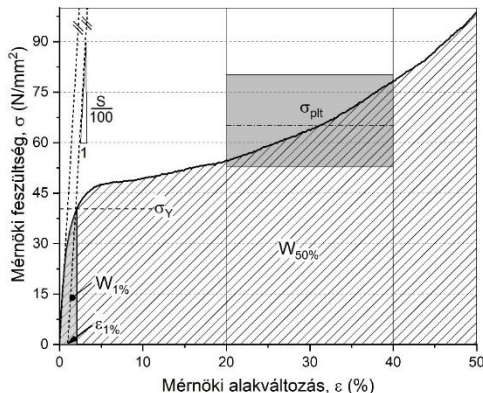
- 1) Különböző mátrixanyagú és hőkezeltségi állapotú szintaktikus fémhab próbatetek előállítás és nyomóvizsgálata;
- 2) egy olyan végeselemes modell létrehozása, mely teljes mértékben leképez egy zömítő vizsgálatot;
- 3) modális analízis, analitikus módszerek és végeselemes szimuláció segítségével meghatározni az általam vizsgált szintaktikus fémhabok effektív rugalmassági modulusát és
- 4) radiális irányban gátolt zömítések elvégzése, amely lehetővé teszi Shima-Oyane anyagmodell paramétereinek illesztését.

A továbbiakban az egyes témakörökhöz tartozó kísérleti és anyagvizsgálati munkát, valamint az elemzési és értékelési eredményeket témakörönként összegzem, kifejezetten olyan felépítésben, hogy ezek az összegzések kellő alapot és indokolást adjanak a tézisek rövid megfogalmazásához.

5.1. A mátrixanyag és hőkezeltségi állapot hatása a globomet gömbhéjakkal erősített szintaktikus fémhabok tulajdonságaira

A kísérleteim során négyféle mátrixanyagot (Al99,5, AISi12, AlMgSi1, AlCu5) használtam, melyeket minden esetben a Hollomet cég globomet (GM) márkanévű tiszta vas gömbhéjával erősítettem. A gyártáshoz kisnyomású infiltrálást alkalmaztam, amely után három különböző méretű próbatesteket munkáltam ki a tömbből. Minden próbatest 14 mm átmérőjű volt, a magasságuk pedig rendre 14, 21 és 28 mm. A gyártást követően egy lágyító (O) hőkezelést végeztem, amely során 520°C-on 1 órán keresztül hőn tartottam majd vízben hűtöttem minden próbatestet. A két kiválasztott keményíthető ötvözetnél (AlMgSi1 és AlCu5) ezt követően mesterséges öregítést (T6) hajtottam végre 170°C-on, 14 órán keresztül. A jelölési séma a következő: mátrixanyag-erősítőanyag-hőkezelés.

Ezt követően hajtottam végre a nyomóvizsgálatokat az MTS 810 univerzális anyagvizsgáló berendezésen 0,01 1/s intergálközepű alakváltozási sebességgel. Az 1. ábra mutatja be azokat az értékeket, amiket a szabvány szerint kiértékeltem.



1. ábra A vizsgált szabványos mérőszámok értelmezése.

Az általam vizsgált mérőszámok a következők voltak: a kezdeti mereedség, vagyis a szerkezeti merevség – S (MPa) – az első érték, amit meghatároztam, ehhez egyenest illeszttem a kezdeti szakaszra, majd a kapott egyenes merekségét elosztottam 100-al (a százalékos ábrázolás miatt). Az illesztés minden esetben 6 és 18 MPa közötti értékre történt. Megjegyzendő, hogy a szerkezeti merevség nem azonos a darab effektív rugalmassági modulusával (vagyis a fémhabot helyettesítő homogén, izotróp test rugalmassági modulusával). A következő lépésben ezzel az egyenessel párhuzamost húztam az $\varepsilon=1$ % alakváltozásnál, annak érdekében, hogy meghatározzam az 1%-os maradó alakváltozáshoz tartozó egyezményes folyáshatárt (σ_Y (MPa)) és elnyelt munkát. Ezt a munkát – $W_{1\%}$ (J/cm³) – úgy kaptam meg, hogy megkerestem a σ_Y -hoz tartozó ε értéket, majd a görbét eddig az értékig numerikusan integráltam. A következő érték, amit meghatároztam a platófeszültség – σ_{pit} (MPa) – ami a közel vízszintes részhez tartozna. Az én görbéimen látszik, hogy nincs vízszintes rész, hanem folyamatosan növekszik a feszültségérték, ezért a platófeszültséget (az ISO 13314 szabvány [7] ajánlásának megfelelően) úgy számoltam, hogy átlagoltam a feszültséget az $\varepsilon=20$ -40%-ig terjedő szakaszon. A következő érték, amit ki kell számolni a teljes alakításhoz tartozó munka – $W_{50\%}$ (J/cm³) – ezt pedig úgy kaptam, hogy numerikusan integráltam a teljes görbe alatti területet 50%-os alakváltozásig. Ezen kívül meghatároztam az energiaelnyelés hatékonyságát – W_h (%) – amelyet az alábbi képlettel kell meghatározni:

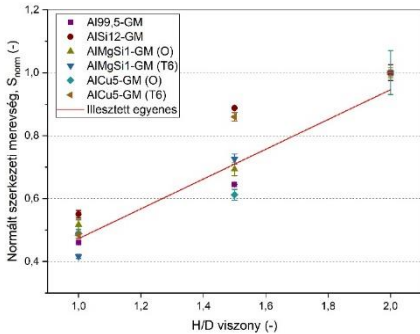
$$W_h = \frac{W}{\sigma_0 \varepsilon_0} 10^4 \quad (1)$$

Ahol W_h – az energiaelnyelés hatékonysága, W – az 50%-os alakváltozásig elnyelt energia az én esetemben, σ_0 – az 50%-os alakváltozásnál mért feszültség és ε_0 – az alakváltozás felső határa, ami az én esetemben 50% volt.

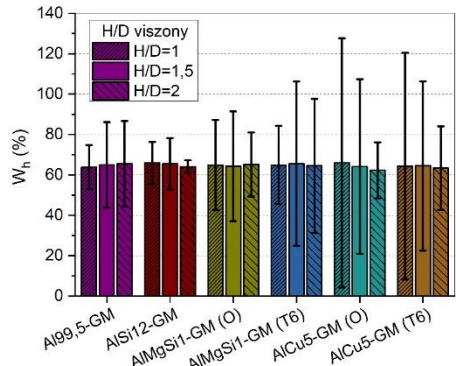
A szerkezeti merevség esetében, ahhoz, hogy a méretfüggésről még pontosabb képem legyen, normalizáltam az értékeket, mégpedig a $H/D=2$ -höz tartozó értékkel. A pontokra a szórás figyelembevételével egy origón áthaladó egyenest illeszttem, melynek mereksége 0,473-ra adódott és az illesztés szórás négyzete 0,996 volt. Ezek alapján kijelenthető, hogy a próbatest méretei között és a szerkezeti merevség között lineáris kapcsolat van. A 2. ábra a normalizált szerkezeti merevséget mutatja be, míg a 3. ábra az energiaelnyelés hatékonyságát mátrixanyagoként és H/D viszonyoként szórással.

A vasgömbhéjakkal erősített szintaktikus fémhabok nyomóvizsgálatai során azt figyeltem meg, hogy a teljes alakváltozás alatt képlékenyen viselkedtek, tehát nem törtek ki a próbatestekből darabok, hanem a teljes próbatest egyben maradt és kis hordósodás megjelenése mellett zömült. A teljes zömítés után a próbatesteket szétvágtam és mikroszerkezeti vizsgálatnak vettem alá, annak érdekében, hogy megvizsgáljam jelentek-e meg repedések az anyag belsejében az alakváltozás során. A gömbhéjak részben elváltak a mátrixanyagtól, azonban nem hoztak létre repedéseket, illetve ahogy a mátrixanyag deformálódott deformálta a gömbhéjat is. Ezek alapján kijelenthető, hogy a vasgömbhéjak képlékenyen deformálódnak, továbbá a vasgömbhéjakkal erősített szintaktikus fémhabok szintén képlékeny alakváltozással deformálódnak zömítő vizsgálatok esetén. Ez a tönkremeneteli mód lehet az oka, hogy az energiaelnyelés hatékonysága nem függ se a mátrixanyagtól, se a H/D viszonytól, azonban ez nem jelenthető ki teljes bizonyossággal a nagy szórás mezők miatt.

Az itt összefoglalt kutatási eredményekre alapozva fogalmaztam meg a 1. tézisemet, amely tehát az 5.1. bekezdésben pontosan meghatározott anyagokra, technológiai feltételekre és vizsgálati körülményekre vonatkozóan értelmezendő.



2. ábra A normalizált szerkezeti merevség függése a próbatest H/D viszonyától.



3. ábra Az energiaelnyelés hatékonysága mátrixanyagoként és H/D viszonyoként szórással.

5.2. Szintaktikus fémhabok síklapok közötti nyomóvizsgálatának modellezése

Ebben a fejezetben bemutatásra kerül egy $H=14$ mm magas, $D=14$ mm átmérőjű zömítő próbatest ($H/D=1$) 3D-s modellje, megalkotásától kezdve a végesselemez szimulációig. A mátrixanyag Al99,5, míg az erősítőanyag vasgömbhéj (GM típusú).

A modell megalkotásának első lépése a gömbhéjak véletlenszerű elhelyezésével kezdődik. Első lépésként egy Matlab programot írtam, amely $1\ \mu\text{m}$ -es osztású hálóval osztja fel az általam megadott térfogatú hasábot az x , y , és z irányban is. Ahol ezek a hálók metszik egymást, ott csomópontok alakulnak ki, és ezek a csomópontok lehetnek majd a gömbhéjak lehetséges középpontjai. A következő lépésben beállíthatjuk, hogy egy újonnan lerakandó gömbhéj milyen messze legyen a többi gömbhéjtől. Itt egy tartományt kell megadni, amire azért van szükség, mert ha túl távol helyezi egymástól a gömbhéjakat, akkor nem érjük el a kívánt térkitöltést, ellenben, ha összeérnek a gömbhéjak, akkor a szinguláris pontok miatt nem lehet behálózni a modellt. A tapasztalatok (a modellek kísérleti futtatásai) azt mutatták, hogy minimum $10\ \mu\text{m}$ -es távolságot kell hagyni a gömbök között. Minél kisebb a maximális távolság értéke, annál nagyobb térkitöltés érhető el, azonban ahogy csökkentjük ezt az értéket, úgy exponenciálisan növekszik a program futási ideje, így az optimális maximális távolságra $50\ \mu\text{m}$ adódott. Így alakult ki az a $10\text{-}50\ \mu\text{m}$ -es sáv, amibe lehelyezésre kerülhetnek a gömbhéjak. Azonban ez a kritérium is kevés lenne, mert ha csak egy gömbhéjhoz lenne mindig ilyen közel az újonnan elhelyezett gömbhéj, könnyen elképzelhető olyan eset, hogy nem kapunk megfelelő térkitöltést, mivel pont úgy helyezi el a program a soron következő gömbhéjat, hogy a már lerakott gömbhéjak közé pont nem fér be több. Ennek kiküszöbölésére egy másik kritérium is szerepel a programban. Ez a kritérium azt mondja meg, hogy hány már lehelyezett gömbhéjhez legyen kellően közel az új lerakandó gömbhéj. Azt tapasztaltam, hogy akkor érem el a legjobb térkitöltést a számítási idő minimalizálása mellett, ha ezt az értéket háromnak választom.

A számítási idő csökkentése érdekében úgy módosítottam a programot, hogy sávonként töltsék fel a teret. Ahhoz, hogy a sávok eltolásánál ne alakuljanak ki rossz felületek, egy $2\ \text{mm}$ -es átfedést hoztam létre. Tehát ha a sávot a z irányban mozgatjuk és mondjuk $10\ \text{mm}$ magas, akkor a következő sáv $8\text{-}18\ \text{mm}$ -ig fog tartani. Ezzel a rendszerrel akármekkora mintát létre lehet hozni anélkül, hogy a számítási idő nagyon

megnőne, mindössze lineárisan fog változni a minta méretével, ami nagy előrelépés. Annak érdekében, hogy minél valóságosabb legyen, a gömbhéj átmérő értékeket véletlenszerűen hívja be a program egy fájlból. Ebben a fájlban 700 gömbhéj átmérő értéke található meg, amelyeket az Olympus SZX16 sztereomikroszkóppal mértem meg. Végeredményben a program egy szövegfájl ad, amelyben megtalálható a gömbhéjak középpontjának x, y, és z koordinátája, illetve a hozzá tartozó átmérő érték.

A kiadott szövegfájl segítségével létre hoztam PTC Creo szoftverben a 3D-s modellt. Ezt követően ANSA-ban behálóztam majd MSC Marc Mentat szoftverben elkészítettem a végeeselemes modellt. A szimuláció paraméterei megegyeztek a valós mérés paramétereivel. A kapott mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbe 5%-os pontosságon belül közelítette egymást. Az így validált végeeselemes szimuláció eredményét részletes megvizsgáltam. A szimuláció nagy előnye, hogy bármelyik időpillanatban „bele lehet nézni” az anyag belsejébe. Ezt a lehetőséget kihasználva megállapítottam, hogy a gömbhéjak között kialakuló vékony falakban lesz a legnagyobb a feszültség, így itt éri el először a folyáshatárt majd kezdődik meg a maradó alakváltozás. A tönkremenetel során a zömítés tengelyével 30-45°-os szöget bezárva kialakulnak tönkremeneteli síkok.

Az itt összefoglalt kutatási eredményekre alapozva fogalmaztam meg a 2. tézisemet, amely tehát az 5.2. bekezdésben pontosan meghatározott anyagokra, technológiai feltételekre és vizsgálati körülményekre vonatkozóan értelmezendő.

5.3. Szintaktikus fémhabok effektív rugalmassági modulusa

Ahogy az 5.1. fejezetben láthattuk, a nyomóvizsgálattal meghatározott szerkezeti merevség függ a próbatest méretétől. Ebből kifolyólag nem lehet anyagjellemző. Ebben a fejezetben ezt a szakaszt és kérdést vetem vizsgálat alá. Az eddigiektől eltérően itt nem csak vasgömbhéj erősítésű fémhabokat vizsgáltam, hanem globocer kerámia gömbhéjjal erősített szintaktikus fémhabokat is, a tapasztalatok szélesítése végett. A mátrixanyag Al99,5 és AISi12 volt. A gyártási mód megegyezett a 5.1. fejezetben ismertetettel. Három különböző megközelítésmódot alkalmaztam: (i) modális analízist, (ii) végeeselemes szimulációt, illetve (iii) analitikus módszereket.

A modális analízis során 170×25×15 mm méretű próbatesteket vizsgáltam. Azért döntöttem a téglalap keresztmetszet mellett, mert ebben az esetben az x és y irányú sajátfrekvenciák különbözőek lesznek, míg, ha négyzet keresztmetszetű hasábbal dolgoztam volna, ezek az értékek nagyon közel estek volna egymáshoz és nem lehetett volna őket elkülöníteni egymástól. A kapott első és második sajátfrekvencia értékekből a Timoshenko rúdelmélet segítségével számítottam ki az effektív rugalmassági modulus értékét. Ezt a modellt alkalmazva azt feltételezem, hogy ez egy homogén rúd, melynek keresztmetszete és sűrűsége állandó.

Kétféle végeeselemes szimulációt készítettem. Az egyik modális analízis volt, míg a másik tisztán rugalmas zömítés. Az 5.2. fejezetben bemutatott Matlab program segítségével tetszőleges módon tudtam változtatni a gömbhéjak közötti távolságot, így áttételesen a térkitöltést. Ezáltal – a mérésektől eltérően – lehetőségem nyílt más térkitöltések esetén is vizsgálni a szintaktikus fémhabok rugalmas tulajdonságait.

Az analitikus módszerek közül hárommal foglalkoztam részletesebben, ezek a Mori-Tanaka becslés, a klasszikus önkonzisztens becslés (CSC) és a differenciális önkonzisztens becslés (DSC). Az első kettőhöz elegendő egy rövid Maple programot írnom, ami lefuttatta a számítást, százasod térkitöltés felbontással, és az eredményeket egy-egy szövegfájlba írta ki. Így eredményként megkaptam az effektív rugalmassági modulus értékeket a térkitöltés függvényében. A DSC becsléshez egy Matlab programot

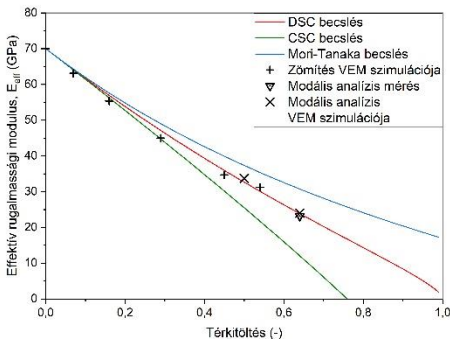
írtam, ami szintén százados felbontással haladt a térkitöltésben, és oldotta meg minden esetben a differenciálegyenletet numerikusan, az explicit Euler módszer segítségével.

A végeelemes szimulációk és analitikus számítások során felhasznált bemeneti paraméterek a mátrixanyagok és erősítőanyagok rugalmassági modulusai, melyeket az 1. táblázat tartalmaz.

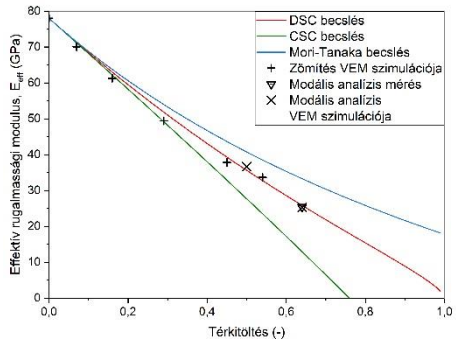
1. táblázat A szimulációk és analitikus számítások során felhasznált anyagok rugalmassági modulusai.

	AI99,5	AlSi12	Globomet	Globocer
Rugalmassági modulus (GPa)	70	78	200	93

A háromféle megközelítésből kapott eredményeket a kerámia gömbhéjjal erősített szintaktikus fémhabok esetén a 4. és 5. ábra mutatja be.



4. ábra A mérés, szimuláció és analitikus modellek eredményei az effektív rugalmassági modulusra vonatkozóan a térkitöltés függvényében, AI99,5-GC fémhab esetén.

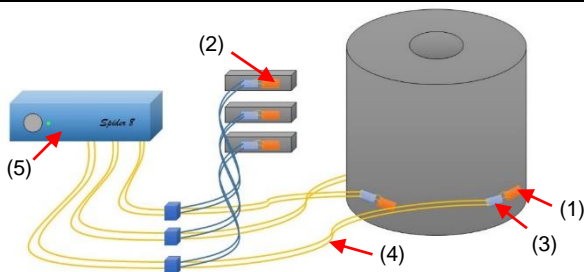


5. ábra A mérés, szimuláció és analitikus modellek eredményei az effektív rugalmassági modulusra vonatkozóan a térkitöltés függvényében, AlSi12-GC fémhab esetén.

Az itt összefoglalt kutatási eredményekre alapozva fogalmaztam meg a 3. tézisemet, amely tehát az 5.3. bekezdésben pontosan meghatározott anyagokra, technológiai feltételekre és vizsgálati körülményekre vonatkozóan értelmezendő.

5.4. Radiális irányban gátolt zömités

Ebben a fejezetben bemutatott vizsgálatokhoz háromféle mátrixanyagot (Al995, AlSi12 és AlSi10MnMg) és kétféle erősítőanyagot (vasgömbhéj és duzzasztott agyagkavics) használtam fel. Ehhez a méréshez szintén az MTS 810 típusú hidraulikus univerzális anyagvizsgáló gépet használtam. Egy 30 mm belső átmérőjű, 90 mm külső átmérőjű és 50 mm magas hengerbe helyeztem be a próbatesteket, amelyek Ø30×30 mm méretű hengerek voltak, majd egy 30 mm átmérőjű bélyeggel zömitettem össze őket. A vizsgálatot 1 mm/perc alakítási sebességgel végeztem, és az erő – elmozdulás adatokat rögzítettem közben. Ezen felül a szerszámot három oldalról nyúlásmérő bélyeggel szereltem fel. Egymáshoz képest 120°-os eltolásban helyezkedtek el a matrica külső oldalán. A mérési összeállítást a 6. ábra mutatja be.



6. ábra A radiális irányban gátolt zömítés mérési összeállításának sematikus ábrája.
 (1) nyúlásmérő bélyeg, (2) kompenzátor bélyeg, (3) forraszpont, (4) kábel az adatgyűjtőig, (5) adatgyűjtő.

A nyúlásmérő bélyeg mérésből $\mu\text{m}/\text{m}$ mértékegységű jeleket tudtam meghatározni, amelyet úgy számoltam mechanikai feszültséggé, hogy elosztottam 10^6 -nal majd megszoroztam 210 000-el – mivel a szerszám rugalmassági modulusa 210 000 MPa - amely után MPa-ban kaptam a feszültség értékeket. Az erő – elmozdulás és a nyúlásmérő bélyeg jeleit az idő alapján párosítottam össze, mivel mind a két gép regisztrálta a mérés kezdete óta eltelt időt. Így a szerszámban ébredő feszültség függvényében is tudtam ábrázolni az alakításhoz szükséges erőt.

A méréseket az 5.1. fejezetben bemutatott kiértékelési módhoz hasonlóan értékeltem ki. Az agyagkavics és vasgömbhéj erősítőanyaggal gyártott fémhabok között nagy eltérés figyelhető meg a vizsgált mechanikai tulajdonságokban, ami főként abból fakad, hogy míg a vasgömbhéjak üregesek, addig a duzzasztott agyagkavics szerkezete porózus, ezáltal sokkal több anyagot tartalmaz, amely által ezeket az anyagok sokkal hamarabb eléri a tömörödési alakváltozást. Az eredményekből megállapítottam, hogy 200 kN-os terhelésszintig elnyelt energiák között nem figyelhető meg, se mátrixanyag se erősítőanyag függés.

Ezt követően meghatároztam a Shima-Oyane anyagmodell paramétereit. Ehhez szükségem volt a fémhab feszültségállapotára, melyre a nyúlásmérő bélyegek adataiból tudtam visszszámolni a vastagfalú csőelmélet segítségével. Mivel ez az elmélet végtelen hosszú csövet feltételez, amely végtelen hosszon van belülről egyenletesen terhelve, ezért előzetes szimulációt végeztem arra, hogy mekkora eltérést kapok, ha ezt az elméletet használom. Azt tapasztaltam, hogy a szimuláció által kapott és az elmélet által számolt értékek között maximálisan 5%-os eltérés volt, ami lehetővé teszi, hogy felhasználjam ezt az elméletet. Ezen információkat felhasználva meghatároztam a paramétereiket, majd végeselemes szimulációt készítettem a validálásra.

A szimuláció eredményeivel bebizonyítottam, hogy a Shima-Oyane anyagmodell alkalmas a vasgömbhéj és agyagkavics erősítőanyagú alumínium mátrixú szintaktikus fémhabok modellezésére. Ez azért nagyon jelentős lépés, mert ezáltal, nem csak az adott méretű és feszültségállapotú próbatestekből kapott eredményeket tudjuk felhasználni a tervezés során, hanem már a nagyobb méretű és bonyolult igénybevételeknek kitett alkatrészeket is. Ezen felül a szimulációs igényeket is nagymértékben lecsökkenti ez az eljárás, mivel a fémhabokat ebben az esetben már, mint tömbi anyagot lehet kezelni.

Az itt összefoglalt kutatási eredményekre alapozva fogalmaztam meg a 4. és 5. tézisemet, amely tehát az 5.4. bekezdésben pontosan meghatározott anyagokra, technológiai feltételekre és vizsgálati körülményekre vonatkozóan értelmezendő.

6. A KUTATÓMUNKA EREDMÉNYEI TÉZISPONTOKBA FOGLALVA

Az 1-5. fejezetben mutattam be a kutatási eredményeimet, amelyeket a célkitűzésekből kiindulva a kutatómunkám során elértem, és a doktori értekezésemben részletesen ismertettem. Ez az összefoglaló-szerkezet lehetővé teszi a tézispontok műfajhú (vagyis egyértelmű és a lehető legrövidebb) megfogalmazását.

1. tézis: [S1-S5]

Az Al99,5, AlSi12, AlMgSi1 illetve AlCu5 mátrixú vasgömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok ISO 13314:2011 szabványnak megfelelően meghatározott szerkezeti merevség értéke és a próbatest magassági értékei között lineáris összefüggés áll fenn.

2. tézis: [S6]

Létrehoztam egy numerikus eljárást, mely 5%-os pontosságon belül közelítette a platófeszültséget, valamint az elnyelt mechanikai energia értékét az Al99,5 mátrixú vasgömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok esetén. Ezzel a validált eljárással kimutattam, hogy a tönkremenetel a gömbhéjak közötti vékony falakban kezdődik meg.

3. tézis: [S7-S9]

Modális analízis segítségével validáltam, hogy az analitikus módszerek közül a differenciális önkonzisztens becslés adja a legjobb közelítést, valamint a végelemes szimuláció 5%-os hibán belül képes az Al99,5 és AlSi12 mátrixú vas- vagy kerámia gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok effektív rugalmassági modulusának meghatározására.

4. tézis: [S10]

A vas gömbhéj (Globomet) és agyagkavics (LECAP) erősítésű alumínium mátrixú (Al99,5, AlSi12 és AlSi10MnMg) szintaktikus fémhabok radiálisan gátolt zömítéseiből meghatároztam az elnyelt mechanikai energia értékeket, mely eredményekből megállapítottam, hogy a 40%-os alakváltozásig elnyelt energia függ a mátrixanyagtól és a töltőanyagtól azonban a 283 MPa feszültség szintig elnyelt energia közel azonos volt mátrixanyagtól és töltőanyagtól függetlenül.

5. tézis: [S10]

Meghatároztam a Shima-Oyane anyagmodell paramétereit radiális irányban gátolt zömítéssel. Bebizonyítottam, hogy a Shima-Oyane anyagmodell alkalmas a vasgömbhéj (Globomet) és agyagkavics (LECAP) erősítésű alumínium mátrixú (Al99,5, AlSi12 és AlSi10MnMg) szintaktikus fémhabok modellezésére.

7. A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] **Szlanicsik A**, Katona B, Bobor K, Májlínger K, Orbulov IN, Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres, *Materials & Design* 83, (2015) 230-237; IF: 3,997
- [S2] Bálint A, Májlínger K, **Szlanicsik A**, Fém gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai, *Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat* 147 (2014:3) 39-44.
- [S3] Bálint A, Kovács Zs, **Szlanicsik A**, Vas gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok nyomószilárdsági tulajdonságai (Compressive characteristics of iron hollow sphere reinforced metal matrix syntactic foams), *OGÉT 2013 XXI Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Konferencia helye, ideje: Arad, Románia, 2013.04.25-2013.04.28. Szerkesztő: Dr. Csibi Vencel-József, Kiadja: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), Kolozsvár Románia pp. 32-35.*
- [S4] Bálint A, **Szlanicsik A**, Mechanical Properties of Iron Hollow Sphere Reinforced Metal Matrix Syntactic Foams, *Materials Science Forum* 812 (2015) 3-8.
- [S5] **Szlanicsik A**, Katona B, Májlínger K, Orbulov IN, Compressive behavior and microstructural characteristics of iron hollow sphere filled aluminum matrix syntactic foams, *Materials* 8 (11), (2015) 7926-7937; IF: 2,728
- [S6] Katona B, **Szlanicsik A**, Tábi T, Orbulov IN, Compressive characteristics and low frequency damping of aluminium matrix syntactic foams, *Materials Science and Engineering: A* 739, 140-148; IF: 4,081
- [S7] **Szlanicsik A**, Katona B, Dombóvári Z, Orbulov IN, On the effective Young's modulus of metal matrix syntactic foams, *Materials Science and Technology* 33 (18), 2283-2289; IF: 1,008
- [S8] Kádár Cs, **Szlanicsik A**, Dombóvári Z, Orbulov IN, Monitoring the failure states of a metal matrix syntactic foam by modal analysis, *MATERIALS LETTERS* 257 p. 126733 Paper: 126733 (2019)
- [S9] **Szlanicsik A**, Dombóvári Z, Katona B, Orbulov IN, Szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságainak becslése és mérése (Measurement and estimation of mechanical properties of metal matrix syntactic foams), *OGÉT 2017 XXI Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Szerkesztő: Dr. Csibi Vencel-József, Kiadja: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), Kolozsvár Románia pp. 396-399*
- [S10] **Szlanicsik A**, Orbulov IN, Compressive properties of metal matrix syntactic foams in uni- and triaxial compression, *Composites Part B: Engineering; Bírálólat alatt, „major revision”*