



Tézisfüzet

Szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai ciklikus, illetve nagy alakváltozási sebességű zömítés során

PhD-értekezés

Katona Bálint

okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Orbulov Imre Norbert, egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola
Anyagtudomány alprogram

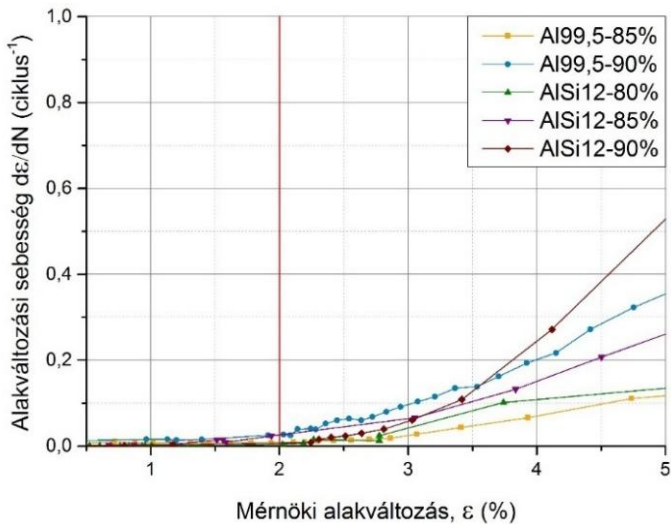
Anyagtudomány és Technológia Tanszék
Budapest, 2018



Doktori munkám során feldolgoztam és elemeztem a fémhabok, ezen belül a szintaktikus fémhabok releváns szakirodalmát. Ez alapján megfogalmaztam fő célkitűzéseimet, amelyek után részletesen ismertettem az elvégzett méréseket, vizsgálatokat, az azokból kapott főbb eredményeket, valamint a belőlük levonható, a gyakorlat számára is hasznos következtetéseket. A doktori munkám fő eredményeit tézisek formájában a következő alfejezetekben foglalom össze.

I. A KERÁMIA GÖMBHÉJAKKAL TÖLTÖTT SZINTAKTIKUS FÉM HABOK TÖNKRENETELE ISMÉTLŐDŐ IGÉNYBEVÉTEL ESETÉN

A szintaktikus fémhabok fárasztó igénybevétel hatására adott válaszána vizsgálat a szakirodalom elemzése alapján komoly hiányosságokat mutat, amely többek között az alkalmazott törési alakváltozást is magába foglalja.



1. ábra. A vizsgált szintaktikus fémhabok fárasztóvizsgálati adatsorából meghatározott alakváltozási sebesség - mézői feszültség görbék

Az általam előállított Al99,5 és AlSi12 alumínium mátrixú Globocer típusú vegyes oxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok fárasztóvizsgálatából kapott eredmények alapján megfigyeltem, hogy a mérés elején az alakváltozás gyorsan növekszik, ekkor a próbatest szerszámmal érintkező felületi rétegei zömölnek, amely 0,5-1 %-os mézői alakváltozást eredményez. Ez a folyamat gyorsan, a terhelési szinttől függően 10-1000 ciklus alatt végbemegy. Ezt egy konstans növekedéssel terhelt szakasz követi, amely a vizsgálat egészére nézve a leghosszabb és az anyag tényleges ellenállását

jelenti. A mérnöki alakváltozás 1,5-2 %-ot elérve, annak egy gyors növekedése figyelhető meg, amely a próbatest törésével párosul. Ebben a szakaszban a fémhab belső szerkezete jelentősen károsodik, amely makroszkopikus szinten nagy alakváltozást eredményez.

Az egyes terhelési szinteken végezett fásasztóvizsgálatok adatsorából meghatározott alakváltozási sebesség - mérnöki feszültség görbék (1. ábra) alapján megfigyelhető, hogy az alakváltozás drasztikus növekedése jellemzően a 2 %-os mérnöki alakváltozást elérve indul meg, vagyis a minták tönkremenetelének kezdete ezzel az alakváltozás értékkel párosítható. Ez alapján igazolást nyer az $\varepsilon = 2$ %-os mérnöki alakváltozáshoz definiált törési kritérium alkalmazhatósága.

1. Tézis [4] [5] [7] [9] [13]

Az elvégzett $D = 8,5$ mm átmérőjű és $H/D = 1,5$ karcsúsággal rendelkező Al99,5 és AlSi12 mátrixanyagú, ~64 tf% Globocer (GC) típusú vegyesoxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok tisztán nyomó terhelés melletti fásasztóvizsgálata alapján megállapítottam, hogy az alakváltozás drasztikus növekedése jellemzően a 2 %-os mérnöki alakváltozást elérve indul meg – ahol egyben az alakváltozás ciklusonkénti növekedése is felgyorsul –, így a minták tönkremenetelének kezdete ezzel az alakváltozás értékkel párosítható. Az $\varepsilon = 2$ %-os mérnöki alakváltozás, mint törési kritérium alkalmas a szintaktikus fémhabok fáradási tulajdonságainak kiértékeléséhez.

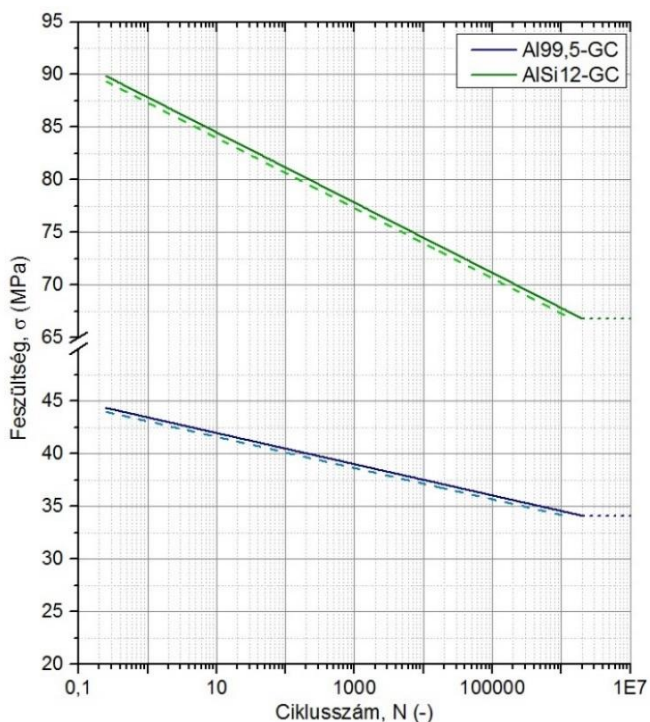
2. A KERÁMIA GÖMBHÉJAKKAL TÖLTÖTT SZINTAKTIKUS FÉM HABOK FÁRADÁSI TULAJDONSÁGAI

A szintaktikus fémhabok (és általánosságban a fémhabok) fásasztó igénybevétel hatására adott válaszában vizsgálata a szakirodalom elemzése alapján komoly hiányosságokat mutat. Ezt szem előtt tartva doktori munkám egyik fő célkitűzése az általam előállított Al99,5 és AlSi12 alumínium mátrixú Globocer típusú vegyes oxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok fásasztóvizsgálatainak elvégzése, kiértékelése, valamint a kapott eredmények alapján a gyakorlat számára is hasznos következtetések levonása.

A fásasztóvizsgálatokat egy Instron 8872-es típusú hidraulikus anyagvizsgáló gépen egy 2 oszlopos zömítő szerszámmal végeztem el. A fásasztóvizsgálatok során az alkalmazott terhelés egytengelyű $f = 10$ Hz-es, lüktető szinuszos nyomóterhelés volt $R = 0,1$ aszimmetria tényezővel. Az egy cikluson belül lévő maximális nyomófeszültség az adott próbatestre érvényes nyomószilárdságból számoltam ki. Az általam végzett fásasztóvizsgálatnak akkor lett vége, amikor vagy bekövetkezett a törési kritérium, vagy a vizsgálat elérte a $2 \cdot 10^6$ ciklusszámot. Tönkremeneteli kritériumnak az $\varepsilon = 2$ %-os mérnöki alakváltozást tekintettem. Amennyiben ezt a mértékű alakváltozást nem szenvedte el a próbatest a $2 \cdot 10^6$ ciklusig, akkor a mérés leállt a próbatest pedig károsodás nélkül kibírta a műszaki szempontból végtelennek mondható ciklusszámot.

Az adatok kiértékeléséhez – a szintaktikus fémhabok esetében először – különböző statisztikai módszereket (Weibull eloszlás alapú analízis, Dixon-Mood eljárás) alkalmaztam azért, hogy a kapott eredmények megbízhatóak legyenek. A vizsgálataim során végig terhelési szintekkel (az adott próbatest nyomószilárdságára fajlagosított feszültség értékkel) dolgoztam azért, hogy az átlagos értékből való számolás esetén jelentkező pontatlanságot feloldjam. A gyakorlati felhasználást figyelembe véve a kapott k-N összefüggésekből előállítottam az S-N, illetve a biztonsági tényezővel ellátott S-N_b összefüggéseket, amely utóbbi egy későbbi tervezéshez/méretezéshez is felhasználható.

Az elvégzett mérésekkel és annak kiértékelésével megkaptam az Al99,5-GC és az AlSi12-GC típusú kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok S-N összefüggéseit.



2. ábra. A vizsgált szintaktikus fémhabok fárasztóvizsgálati adatsorából meghatározott feszültség-ciklusszám összefüggések.

2. Tézis [4] [5] [7] [9] [13]

Elvégeztem az Al99,5 és AlSi12 mátrixanyagú, ~64 tf% Globocer (GC) típusú vegyesoxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok tisztán nyomó terhelés melletti fárasztóvizsgálatát $f = 10$ Hz-es frekvencián $R = 0,1$ -es feszültség aszimmetria tényező mellett. A mérethatást minimalizáló méretű próbatestek ($D = 8,5$ mm, $H/D = 1,5$), a megbízható statisztikai kiértékelést lehetővé tevő mintaszám, valamint a statisztikai alapú kiértékelés segítségével a meghatározott feszültség – ciklusszám ($S-N_D$) összefüggések a gyakorlati felhasználás szempontjából is felhasználható eredményeket adnak a vizsgált kerámia gömbhéjakkal töltött ipari tisztaságú alumínium (Al99,5) és öntészeti alumínium ötvözet (AlSi12) mátrixú szintaktikus fémhabok fáradási tulajdonságairól. A statisztikai kiértékelés alapján az egyes anyagok $S-N_D$ összefüggései a következő egyenletekkel írhatók le:

$S_{Al99,5-GC} = 43,1 \text{ (MPa)} - 1,48 \cdot \lg N_D$, az ipari tisztaságú alumínium (Al99,5) mátrixanyagú Globocer kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok és

$S_{AlSi12-GC} = 87,3 \text{ (MPa)} - 3,33 \cdot \lg N_D$ az öntészeti alumínium (AlSi12) mátrixanyagú Globocer kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok esetében.

A vizsgált anyagokra a $2 \cdot 10^6$ ciklusszámhoz tartozó feszültségek ($R = 90$ %-os túlélési valószínűség mellett, $C = 95$ % konfidenciaszinten) számszerű értékei 34,1 MPa az Al99,5-GC, illetve 66,8 MPa az AlSi12-GC típusú anyagok esetében.

3. A KERÁMIA GÖMBHÉJAKKAL TÖLTÖTT SZINTAKTIKUS FÉM HABOK TÖNKREMETELI MECHANIZMUSA ISMÉTLŐDŐ IGÉNYBEVÉTEL HATÁSÁRA

A szintaktikus fémhabok fárasztó igénybevétel hatására adott válaszában vizsgálata a szakirodalom elemzése alapján komoly hiányosságokat mutat, amely többek között az alkalmazott törési mechanizmus leírását is magába foglalja.

A belső szerkezet károsodásának megfigyeléséhez a fárasztóvizsgálatokat követően az egyes mintákból a hossz tengely mentén csiszolatokat készítettem, amelyek így lehetőséget biztosítottak a fémhab struktúra mikroszkópi vizsgálatára. Az eltérő mátrixanyagú szintaktikus fémhab minták esetében eltérő tönkremeneteli mechanizmus vált megfigyelhetővé, amely azonban nem függött az adott fárasztó igénybevételnél alkalmazott terhelés mértékétől.

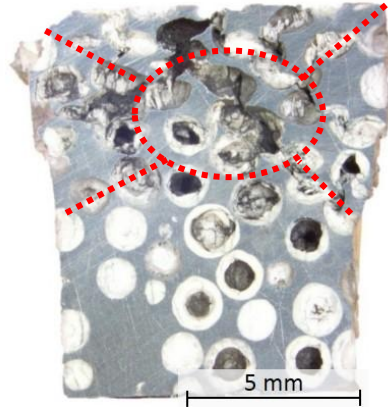
A lágyabb (3. ábra), ipari tisztaságú alumínium mátrixú kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhab minták esetében egy törési sáv volt megfigyelhető, amely a terhelés irányával mintegy 45° -os szöget zárt be. A törési sáv jelenléte a mátrixanyag képlékeny alakváltozásának következménye, amely a tárgyalt anyagnál megelőzi a

töltőanyagként használt kerámia gömbhéjak tönkremenetelét. A gömbhéjak a sávon belül eltörtek és az üregek tömörödtek, viszont a törési sávon kívül eső gömbhéjak jóval kevésbé, vagy egyáltalán nem károsodtak, így kijelenthető, hogy a fásztzó igénybevétel hatására a létrejövő alakváltozás lokalizálódik az anyagon belül.

A keményebb (4. ábra), szilíciummal ötvözött alumínium mátrixú kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhab minták esetében, eltérően a fentebb taglalt ipari tisztaságú mátrixú fémhabokhoz, a tönkremenetel két kúpfelületre lokalizálódik, valamint az azok találkozásánál lévő lencse alakú régióra. Ezen anyagok esetében, az alapfém nagyobb folyáshatárának köszönhetően, a gömbhéjak törése megelőzi a mátrix képlékeny alakváltozását, aminek következtében kialakul az imént ismertetett törési mód. Ennél a típusú szintaktikus fémhabnál is megfigyelhető, hogy a károsodott régiótól messze eső gömbhéjak jóval kevésbé vagy egyáltalán nem károsodtak.



3. Az Al99,5-GC típusú szintaktikus fémhab hosszmetzeti csiszolatának mikroszkópos felvétele a fásztást követően.



4. Az AlSi12-GC típusú szintaktikus fémhab hosszmetzeti csiszolatának mikroszkópos felvétele a fásztást követően.

3. Tézis [5] [6] [7] [9] [13]

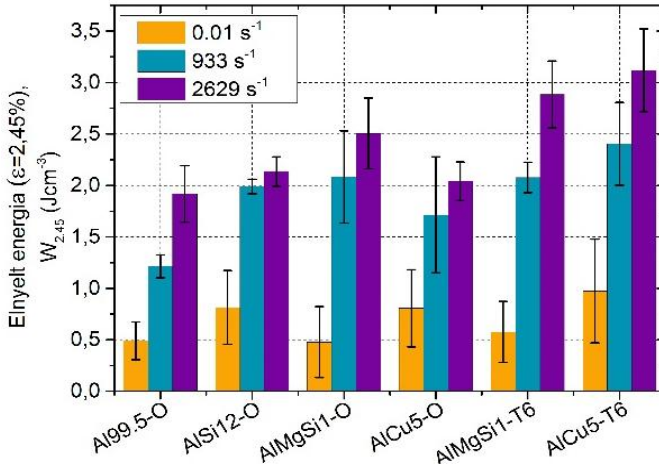
A $D = 8,5$ mm átmérőjű és $H/D = 1,5$ karcsúsággal rendelkező Al99,5 és AlSi12 mátrixanyagú, ~64 tf% Globocer (GC) típusú vegyesoxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok tisztán nyomó terhelés melletti fárasztóvizsgálata alapján megállapítottam, hogy a lágyabb mátrixú (Al99,5) anyagok esetében a tönkremenetel jellemzően egy, a terhelés irányával 45° -ot bezáró nyírási zónában megy végbe, mivel a gömbhéjak törését megelőzi a mátrixanyag képlékeny alakváltozása. A nagyobb szilárdsággal rendelkező (AlSi12) fémhab esetében a tönkremenetel egy lencse formájú tömörödési zónában és a belőle induló kúpfelületeken indul meg, ahol a gömbhéjak összetörése, majd a mátrix alakváltozása következik be. Mindkét anyag esetében megállapítottam, hogy a tönkremeneteli helyektől távol az anyag nem szenved károsodást.

4. A KERÁMIA GÖMBHÉJAKKAL TÖLTÖTT SZINTAKTIKUS FÉM HABOK DINAMIKUS TULAJDONSÁGAI

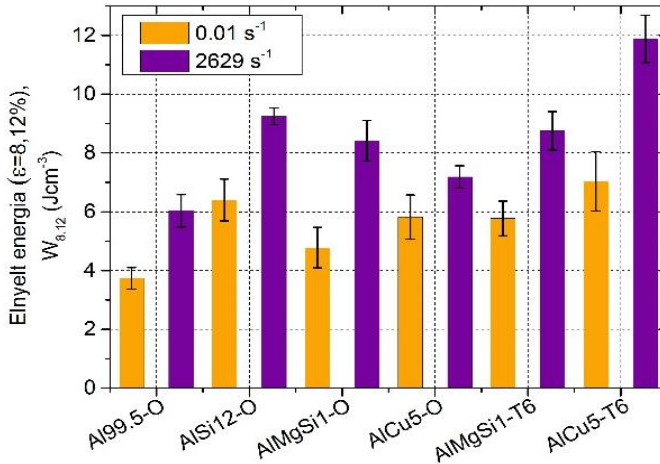
Doktori munkám – a szintaktikus fémhabok fárasztóvizsgálatán túli – másik fő célkitűzése az általam előállított Al99,5, AlSi12, AlMgSi1 és AlCu5 alumíniumötvözet mátrixú Globocer típusú vegyes oxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok nagy alakváltozási sebesség melletti zömítő vizsgálatának elvégzése, kiértékelése, valamint a kapott eredmények alapján a gyakorlat számára is hasznos következtetések levonása.

A nagy alakváltozási sebességű méréseket úgynevezett Split Hopkinson berendezéssel (Split Hopkinson Pressure Bar vagy Kolsky Bar) hajtottam végre. A vizsgálati eljárás az anyagok dinamikus terhelésre adott válaszát adja meg, amely így kiválóan használható nagy alakváltozási sebességű terhelések, mint például ütközések szimulálásához.

Az alkalmazott berendezésen két eltérő alakváltozási sebességű mérést hajtottam végre a vizsgált szintaktikus fémhabok próbatesteken, amelyek az „ütő rúd” 138 kPa (20 psi), illetve 552 kPa-os (80 psi) nyomással való kilövésével értem el. A különböző nyomásértékekkel figyelembe véve a próbatestek hosszát, a megvalósított alakváltozási sebességek $\dot{\epsilon} = 933 \text{ s}^{-1}$ (5. ábra), illetve $\dot{\epsilon} = 2629 \text{ s}^{-1}$ (6. ábra) értékeknek feleltek meg. Gyakorlati felhasználás szempontjából (például ütköző zónába való beépítés) a megvalósított zömítések megfeleltek egy 54 km/h, illetve egy 126 km/h sebességű ütközésnek. A teszt jellegéből fakadóan a megvalósítható alakváltozás korlátolt, ami a kisebb sebességű tesztek esetében $\epsilon = 2,5\text{-}3,5\%$, míg a nagyobb sebességű tesztek esetében ez $\epsilon = 8\text{-}10\%$ értékeket jelent.



5. A kvázi-statis és a nagy alakváltozási sebességű zömítések esetében számolt elnyelt energia ($\epsilon=2,45\%$ -os alakváltozásig) számszerű értékei a különböző mátrixanyagú és hőkezeltségű szintaktikus fémhabok esetében.



6. A kvázi-statis és a nagyobb alakváltozási sebességű zömítések esetében számolt elnyelt energia ($\epsilon=8,12\%$ -os alakváltozásig) számszerű értékei a különböző mátrixanyagú és hőkezeltségű szintaktikus fémhabok esetében.

Az elvégzett vizsgálatok kiértékelését egy erre a célra fejlesztett program segítségével hajtottam végre, amely a mérési adatokból mérnöki feszültség-mérnöki

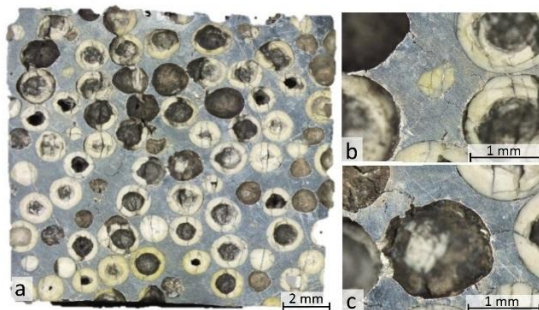
alakváltozás görbéket állít elő, amelyek alkalmasak a további kiértékelésre és következtetések levonására.

4. Tézis [3] [6] [8]

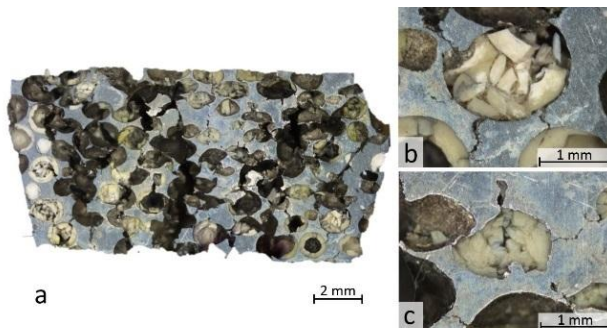
A $D = 12$ mm átmérőjű és $H/D = 1$ karcsúsággal rendelkező Al99,5-O, AlSi12-O, AlMgSi1-O, AlCu5-O, AlMgSi1-T6 és AlCu5-T6 alumínium/alumíniumötvözet mátrixanyagú, ~64 tf% Globocer típusú vegyesoxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok nagy alakváltozási sebességű nyomóvizsgálatának eredményei alapján megállapítható, hogy az elnyelt energia értékek $\varepsilon = 2,5$ %-ig nézve a 933 s^{-1} alakváltozási sebességű mérés esetében mintegy kétszerese, a 2629 s^{-1} alakváltozási sebességű mérés esetében mintegy háromszorosa, $\varepsilon = 8,1$ %-ig nézve a 2629 s^{-1} alakváltozási sebességű mérés esetében pedig mintegy kétszerese a kvázi-statisztikus állapothoz képest az egyes anyagok esetében. A mért értékek növekedésének oka, hogy a dinamikus terhelés hatására nagyobb térfogatú anyagrész vesz részt egy időben az energiaelnyelésben, mint a kvázi-statisztikus terhelés esetében. A mátrixanyag szilárdságának növekedése az elnyelt energia mértékét is növeli, így az általam vizsgált szintaktikus fémhabok közül az AlCu5-T6 mátrixú anyag rendelkezik a legnagyobb energiaelnyelő képességgel.

5. A KERÁMIA GÖMBHÉJAKKAL TÖLTÖTT SZINTAKTIKUS FÉM HABOK DINAMIKUS TERHELÉS HATÁSÁRA BEKÖVETKEZŐ TÖNKREMENTELE

Az általam előállított Al99,5, AlSi12, AlMgSi1 és AlCu5 alumínium mátrixú Globocer típusú vegyes oxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok nagy alakváltozási sebesség melletti zömítő vizsgálatának elvégzését követően a felhasznált próbatestekből hosszcsiszolatokat készítettem annak érdekében, hogy a belső szerkezet dinamikus terhelés hatására bekövetkező tönkremenetelét meg tudjam figyelni.



7. Az Al99,5-O mátrixanyagú szintaktikus fémhab hosszszelvényi csiszolatának mikroszkópos felvétele, az $\dot{\varepsilon}=933 \text{ s}^{-1}$ alakváltozási sebesség mellett végzett zömítés után (a), és jellemző helyek kinagyításával (b,c).



8. Az Al99,5-O mátrixanyagú szintaktikus fémhab hosszszelvényi csiszolatának mikroszkópos felvétele, az $\dot{\epsilon}=2629 \text{ s}^{-1}$ alakváltozási sebesség mellett végzett zömítés után (a), és jellemző helyek kinagyításával (b,c).

Mivel a vizsgálat időbeli lefutása igen rövid (milliszekundumok), ezért a folyamat során az Al99,5-GC és AlSi12-GC minták zömítéseit nagysebességű kamerával rögzítettük. Ennek köszönhetően a vizsgálatok során a próbatestek károsodásának időbeli lefutása a kapott videofelvételek alapján is megfigyelhetővé vált. Az alakváltozási sebesség növelése egyértelműen megváltoztatja a létrejövő károsodási formát a kvázi-statisztikus terhelésnél tapasztaltnál, azonban a hosszszelvényi csiszolatok elemzése alapján megállapítható, hogy a különböző mátrixanyagú és különböző hőkezeltségű minták adott alakváltozási sebesség mellett azonos tönkremeneteli mechanizmus szerint károsodtak (7-8. ábra).

5. Tézis [3] [6] [8]

A $D = 12 \text{ mm}$ átmérőjű és $H/D = 1$ karcsúsággal rendelkező Al99,5-O, AlSi12-O, AlMgSi1-O, AlCu5-O, AlMgSi1-T6 és AlCu5-T6 alumínium/alumíniumötvözet mátrixanyagú, ~64 tf% Globocer típusú vegyesoxid kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok dinamikus zömítés hatására teljes térfogatukban károsodást szenvedtek – szemben a kvázi-statisztikus állapotban végzett zömítésénél tapasztalt lokális károsodással – amely az alakváltozás kezdeti szakaszában, a szintaktikus fémhabban töltőanyagként szolgáló kerámia gömbhéjak a terhelés irányával párhuzamos elrepedésével és a mátrixanyagban az egyes cellák közötti repedések megjelenésével, az alakváltás későbbi szakaszában pedig a már repedt gömbhéjak darabokra hullásával és tömörödésével, valamint a mátrixanyag további repedésével és cellákba való mozgásával jellemezhető. A jelenség oka, a dinamikus terhelés hatására az anyagban gyorsan végig haladó lökéshullám, amely a teljes vizsgált anyagtérfogatra kihat.

6. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

- [1] Attila Szlancsik, **Bálint Katona**, Kristóf Bobor, Kornél Májlinger, Imre Norbert Orbulov: Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres, *Materials & Design* 83 (2015) 230-237
- [2] Attila Szlancsik, **Bálint Katona**, Kornél Májlinger, Imre Norbert Orbulov: Compressive Behavior and Microstructural Characteristics of Iron Hollow Sphere Filled Aluminum Matrix Syntactic Foams, *Materials* 8 (2015:11) 7926-7937
- [3] Kyle Myers, **Bálint Katona**, Pedro Cortes, Imre Norbert Orbulov: Quasi-static and high strain rate response of aluminum matrix syntactic foams under compression, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 79C (2015) 82-91
- [4] Mehdi Taherishargh, **Bálint Katona**, Thomas Fiedler, Imre Norbert Orbulov: Fatigue properties of expanded perlite / aluminum syntactic foams, *Journal of Composite Materials* 51 (2017:6) 773-781
- [5] **Bálint Katona**, Gábor Szebényi, Imre Norbert Orbulov: Fatigue properties of ceramic hollow sphere filled aluminium matrix syntactic foams, *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing* 679C (2017) 350-357
- [6] **Bálint Katona**, Imre Norbert Orbulov: Structural Damages in Syntactic Metal Foams Caused by Monotone or Cyclic Compression, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 61 (2017:2) 146-152
- [7] **Katona Bálint**, Szebényi Gábor, Orbulov Imre Norbert: Fémmátrixú szintaktikus fémhabok fáradási tulajdonságai, *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 148 (2015:2) 30-33
- [8] **Katona Bálint**, Orbulov Imre Norbert: Kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok kvázi-statisztikus és nagy alakváltozási sebességű nyomóvizsgálata, *Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat* 149 (2016:3) 30-35
- [9] Imre Norbert Orbulov, **Bálint Katona**, Gábor Szebényi: Fatigue Properties of Metal Matrix Syntactic Foams, In: *Proceeding of 3rd Conference on Cellular Materials (CELLMAT2014)*, 22-24th October 2014, Dresden, Germany (CD-n jelent meg).
- [10] Keresztes Zoltán, Ladányi-Pára Gergely, **Katona Bálint**: Üveggömbhéj erősítésű alumínium mátrixú szintaktikus fémhab kvázi-statisztikus nyomóvizsgálata, In: *Proceedings of the XXI-th International Scientific Conference of Young Engineers*, 2016.03.17-2016.03.18. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME), (2016) 209-212.
- [11] Ladányi-Pára Gergely, Keresztes Zoltán, **Katona Bálint**: Lehet-e a fémhab köszörűanyag?, In: *Proceedings of the XXI-th International Scientific Conference of Young Engineers*, 2016.03.17-2016.03.18. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME), (2016) 253-256.
- [12] **Katona Bálint**, Szlancsik Attila, Orbulov Imre Norbert: Kerámia gömbhéjakkal töltött szintaktikus fémhabok törésmechanikai vizsgálata, In: *Proceedings of the XXII-th International Scientific Conference of Young Engineers* 2017.03.23-2017.03.24. Kolozsvár, Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME), (2017) 211-214.
- [13] **Katona Bálint**, Szebényi Gábor, Orbulov Imre Norbert: Behaviour of metal matrix syntactic foams under cyclic loading, *Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*. Konferencia helye, ideje: Debrecen, Magyarország, 2016.10.13-2016.10.15. pp. 277-282. (ISBN:978-963-473-944-9)1