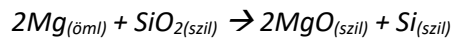
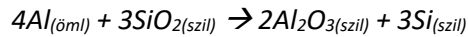


Válaszok Verő Balázs professzor úr opponensi véleményére

Tisztelt Professzor Úr! Köszönöm a pozitív és konstruktív opponensi véleményét, amit tisztelettel elfogadok. Az opponensi véleményből kiemelt konkrét kérdésekre (megjelenésük sorrendjében) a következő válaszokat adom.

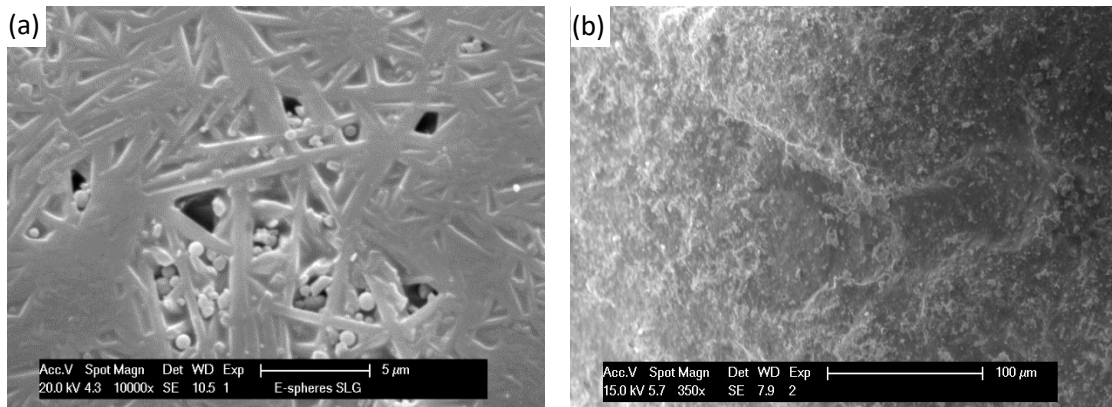
„Bevezetésében Jelölt így fogalmaz: „a szintaktikus fémhabok ... mátrixanyagból ... és erősítőanyagból ... állnak, amelyek között a terhelésátadásáért felelős átmeneti réteg teremt kapcsolatot.”. A szintaktikus fémhabok legjellegzetesebb igénybevétele a nyomás. Az átmeneti réteg szerepével kapcsolatos megállapításra vonatkozó kérdésem: a fémmátrix és a kerámia erősítő anyag között milyen átmeneti réteg alakulhat ki, és milyen kötőerők működése tételezhető fel?”

A szintaktikus fémhabokban az átmeneti réteg – mint minden más kompozitban – alapvetően kétféle lehet: (i) kohéziós és (ii) adhéziós. Az első esetben az átmeneti réteget egy olyan sáv jelenti, amelyen belül a gömbhéj anyaga (vagy anyagának egy része, esetünkben a kerámia gömbhéjak SiO_2 tartalma) és a mátrixanyag (esetünkben annak Al és / vagy Mg tartalma) reakcióba lép egymással az alábbi egyenletek szerint.



Ez a fajta átmeneti réteg abban az esetben jön létre, ha a szintaktikus fémhab gyártására alkalmazott anyagpár reaktív.

A második esetben a gömbhéjak falának felületi egyenetlensége miatt az ömledékkel kialakuló, lényegében alakkal záró kötés jön létre (ebben az esetben az átmeneti réteg inkább fiktív határfelületként értelmezhető, mintsem véges vastagságú réteggént).



A kerámia gömbhéjak felületének SEM képe (a) SL és (b) GC gömbhéj

A valóságban a két módozat változó arányú elegye valósulhat meg. A kötőerők megítélése az egyes esetekben is, és a két módozat együttes fennállása esetén is nehézkes, a szintaktikus fémhabok szakirodalmában egyelőre jellemzően elkerült témakör (nincs tudomásunk a jelenség(ek)re vonatkozó publikációról).

„Kérdésem, hogy a mátrix anyagul szolgáló ötvözetek összetételére vonatkozó, a 3.1 táblázatban szereplő adatok a vonatkozó szabványban szereplő adatokat tükrözik-e, vagy saját mérési eredmények?”

A 3.1 táblázatban szereplő adatok saját mérési eredmények, amelyekből kiemeltem a munka szempontjából fontos ötvözőket.

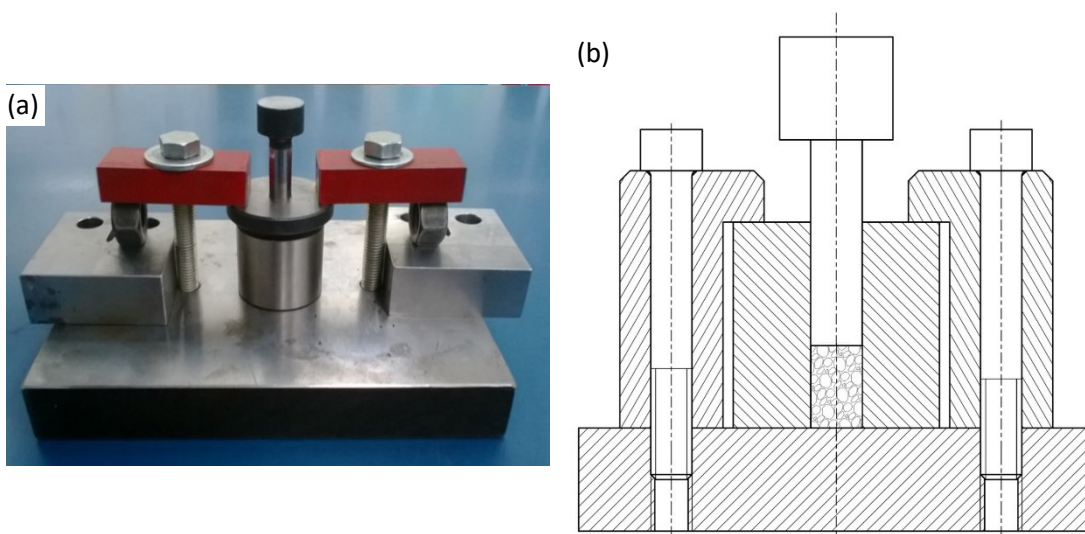
„A karakterisztikus mechanikai jellemzők meghatározása céljából végzett kvázi statikus és a nagy alakváltozási sebességű zömítő vizsgálatkor egyaránt mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramot határoz meg. Kérdésem ezzel kapcsolatban az, hogy miért nem a valódi feszültség-természetes nyúlás összefüggés meghatározását választotta Jelölt? Arra is választ várok, hogy a nagy alakváltozási sebességű zömítéskor hogyan határozta meg a mérnöki nyúlás mértékét?”

A mérnöki rendszer alkalmazásának indoka kettős: (i) körülményes a valódi nyúlás számításához szükséges aktuális átmérő és / vagy magasság meghatározása, mert (a) a próbatestek felülete nem egyenletes, átmérőjük pontos mérése nehézkes és (b) összetételtől függően a próbatestek károsodása lehet egy sík menti hasadás, amely a magasságmérést is értelmetlenné teszi (deformáció helyett „mervetestszerű” elmozdulás); (ii) a fenti problémák miatt a terület kutatói a mérnöki rendszert alkalmazzák (összehasonlíthatóság) és a vonatkozó szabvány (ISO13314:2011) is a mérnöki rendszer használatát javasolja.

A nagy alakváltozási sebességű zömítés során a mérőberendezés számítógéppel segített vezérlése és adatgyűjtése szolgáltatta a mérnöki nyúlás értékét.

„A radiálisan gátolt alakváltozási állapotban végzett zömítő vizsgálatok technikai feltételeinek ismertetésekor szerencsés lett volna egy elrendezési vázlat közlése.”

Ez ugyan nem kérdés, de fontosnak tartom reagálni rá, mert részben az egyik tézis elfogadásának feltétele. A legszemléletesebben egy műszaki rajzzal szemléltethető a válasz. A próbatest minden felületét Molydal NB 1200 kenőanyaggal kentük.



A radiálisan gátolt alakváltozási állapotú mérések elrendezése (a) és elrendezési vázlata (b)

„A 3.3. alfejezet a Jelölt által előállított minták szövetszerkezetét ismerteti „as-cast” állapotban. A fény- és pásztázó elektronmikroszkópos felvételek egyértelműen bizonyítják a nyomásos infiltráció sikeres végbemenetelét, hiszen a fémes mátrixban porozitás csak elvétve figyelhető meg. A négy eltérő összetételű mátrix anyag és az SL és a GC típusú kerámia gömbhéj közötti esetleges reakcióval kapcsolatban Jelölt érdekes megfigyeléseket tett. Kérdésem arra vonatkozik, hogy a 99,5-ös alumínium és a kétféle átmérőjű kerámia gömbhéj közül az egyik esetben miért lép fel reakció, míg a másikkban nem?”

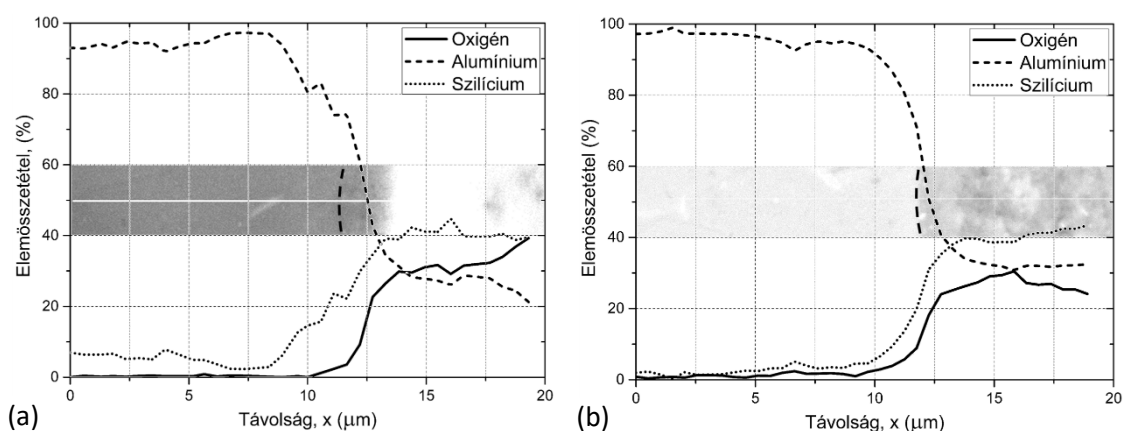
A kisebb (Al99,5-SL) és nagyobb (Al99,5-GC) gömbhéjakkal előállított mintákat rendre a 3.7. és a 3.10. ábra mutatja be. Az ábrákkal kapcsolatos megállapításaim az alábbiak:

„A 3.7. ábra egy Al99,5 mátrixú, SL típusú gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhab jellemző szerkezeti fotóit foglalja össze. A 3.7a. ábrarészleten megfigyelhető a mátrixanyag szövetszerkezete és részben felismerhetők a mátrixanyag és a gömbhéjak közötti, termodinamikailag lehetséges kémia reakció nyomai is (3.2. egyenlet). Megfigyelhető a gömbhéjak helyenként hibákat tartalmazó fala és a kiváló infiltráltság. Az utóbbi két megállapítást alátámasztják a 3.7b-d. részábrák nagyított felvételei. A gömbhéjak falában jelenlévő hibák gömbszerűek, buborék alakúak, ami annak eredménye, hogy a gömbhéjakat zagy állapotban, a csőfúvásos módszerrel állították elő [2]. A kiváló infiltráltságot pedig jól igazolja az, hogy a gömbhéjak közötti néhány mikrométeres részbe is behatolt az Al99,5 mátrixanyag (3.7c és 3.7d. részábrák).”

Illetve:

„Az Al99,5 mátrixanyagú szintaktikus fémhabok (3.10. ábra) megfelelően infiltráltak, szövetszerkezetük homogén, Si kiválásokról mentes. A mátrixanyag a szorosan egymás közelében elhelyezkedő gömbhéjak közötti néhány mikrométeres résekbe is behatolt (3.10c. és 3.10d. részábrák). A nagyobb átlagos átmérőjű GC típusú gömbhéjak fala jóval vastagabb és hibáktól mentes. A GC típusú gömbhéjak porkohászati úton, apró kerámia szemcsékből készültek [3].”

Tehát az Al99,5-GC mintában esetlegesen lejátszódó, a 3.2 egyenletre vonatkozó megállapítást nem tettem. A későbbiekben a kisebb méretű SL gömbhéjakra mutattam be a reakciót alátámasztó elemeloszlás térképeket, amely a GC gömbhéjak esetében is helytálló. Összehasonlításképpen közlöm a két anyagféleség vonalmenti EDS analízisének eredményét, amely alapján belátható, hogy hasonló átmeneti réteg alakul ki mindkét esetben.



Al99,5-SL (a) és Al99,5-GC (b) szintaktikus fémhabok vonalmenti elemösszetétele

„Az infiltrációs kísérletekhez AlSi12 típusú alumíniumötvözetet és SL típusú gömbhéjakat használtak, vagyis a rendszer nem reaktív volt. A mátrixanyagul szolgáló AlSi12 ötvözet egyik fázisának, a szilícium lemezkéinek megjelenési formáját nátriumos kezeléssel befolyásolni lehet és szokás.

Kérdésem arra vonatkozik, hogy mekkora volt az olvadék nátriumtartalma? Az átolvasztás módosítja-e az ötvözet eredeti nátriumtartalmát? Úgy gondolom, a szilícium lemezkék mérete az infiltrált hosszra hatással lehet.”

Az ötvözetben nem volt jelen kimutatható mennyiségű nátrium, sem a műbizonylat, sem a saját mérési eredmények alapján.

„Az infiltrált hosszak a nyomástól való függését leíró kapcsolattal összefüggésben Jelölt kijelenti, hogy 0 nyomáshoz 0 hossz tartozik vagy kell tartoznia. Kérdésem, hogy ebben az összefüggésben a küszöbnyomás értékét hogyan kell figyelembe venni?”

A kitétel általános esetre kívánt vonatkozni. Tökéletes nedvesítést feltételezve 0 kPa nyomáshoz 0 mm infiltrált hossz kellene, hogy tartozzon (amennyiben például a kapilláris hatástól is eltekintünk). A vizsgált esetben a rendszer nem nedvesítő, így a küszöbnyomás alatti infiltráló nyomásokhoz 0 mm infiltrált hossz tartozik. Az ábra átszerkeszthető lenne olyan formában, hogy a küszöbnyomás értékéhez tartsanak az egyenesek. Gyakorlati értelemben minimális eltérés mutatkozna a vizsgált tartományban.

„A mechanikai vizsgálatok előtt Jelölt először a sűrűségmérés eredményeit mutatja be, ezzel bizonyítva a terhelés-átadás szempontjából meghatározó jelentőségű átmeneti réteg kialakulásának jóságát. Jelölt ezzel a megoldással kikerüli az átmeneti réteg tulajdonságainak konkrét meghatározását. Kérdésemet ezzel kapcsolatban már megfogalmaztam, hogyan érvényesül az átmeneti réteg tulajdonsága nyomó igénybevételkor?”

Az átmeneti réteg szerepét a mechanikai tulajdonságokra, különösen a nagy alakváltozású esetekre felmérni igen nehéz, mert a szokásos gyártási módok mellett az átmeneti réteg kialakulását csak oly módon lehet befolyásolni, hogy az kohéziós vagy adhéziós jelleget ölt-e (tehát lényegében kialakul fizikai értelemben vett átmeneti réteg vagy „csak” adhézió jön létre). Ezenfelül, legjobb tudomásom szerint, nincs példa olyan, fizikai kísérleteket leíró publikációra, amely adott kontextusban foglalkozik a vitában forgó átmeneti réteg fizikai tulajdonságainak közvetlen meghatározásával.

„Az 5. fejezet – amely A szintaktikus fémhabok kvázi statikus szabad zömítése címet viseli – az értekezés terjedelmét és mondanivalóját tekintve annak legfajsúlyosabb része. A részterület szakirodalmának összefoglalását az 5.1. alfejezet tartalmazza nagyszámú publikáció megjelölésével. A szakirodalmi feldolgozásban idézett publikációk mondanivalóját Jelölt megállapításokban összegzi, ez a megoldás azonban nem segíti a még megválaszolandó, nyitott kérdések megfogalmazását. Csak egyetlen publikációban [70] érinti a mátrix és az erősítő anyag közötti átmeneti réteg szerepének kérdését. Különösen érdekesek lehetnek ebből a szempontból a [82, 83] munkák részletesebb ismerete, hiszen az AlMgSi mátrixú szintaktikus fémhabot nemcsak nyomó, hanem húzó és nyíró igénybevételnek is kitették. Kérem, hogy Jelölt ezzel kapcsolatban részletesebben ismertesse a kérdéses publikációban foglaltakat.”

A [70] jelzetű cikk bibliográfiai adatai: 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. A dolgozatomban 5. fejezetében a következő megállapításokat teszem a cikkel kapcsolatban:

„Balch és kollégái [69, 70] a mátrix- és az erősítőanyag közötti terhelésátadást vizsgálták diffrakciós 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.”

[Conclusions]: „Optimized syntactic foam properties are predicted when the matrix and microsphere strengths are properly matched through judicious choice of matrix strength (through composition and heat treatment),

microsphere strength (through their material, diameter, and wall thickness) and load transfer between the two phases (through phase volume fraction, interfacial strength, and phase spatial distribution and connectivity)."

„A képlékeny alakváltozás jelei a gömbhéjak közötti vékony falakban megjelenő, helyileg koncentrált alakváltozásokból erednek, amelyet lágy mátrix és erős gömbhéjak párosítására más kutatók is megerősítettek különböző diffrakciós módszerekkel [70]."

[4.4] „For the cp-Al foam, matrix plasticity occurs at low applied stresses before microsphere stresses are high enough to induce fracture. Rather, matrix plasticity results in a large plastic mismatch with, and increased load transfer to, the microspheres and their eventual fracture."

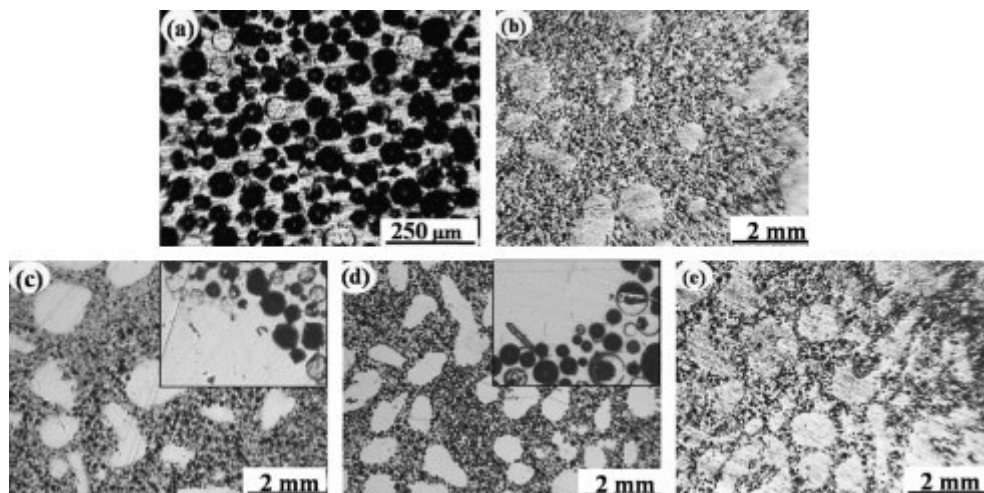
A dolgozatom megfogalmazásából és az eredeti szövegből is látszik, hogy érdemben nem foglalkoztak az átmeneti réteg milyenségével.

A másik két munka bibliográfiai adatai: [82] Tao XF, Zhao YY. Compressive behavior of Al matrix syntactic foams toughened with Al particles. Scripta Materialia 61 (2009) 461-464., illetve [83] 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. Ezekkel kapcsolatban a következő mondatok szerepelnek a dolgozatomban:

„Tao és kollégái [82, 83] gáznyomásos 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."

Ez valóban igazolja az opponensi vélemény állítását, miszerint az AlMgSi mátrixú szintaktikus fémhabot nemcsak nyomó, hanem húzó és nyíró igénybevételnek is kitették. A [82]-es hivatkozás az alábbi említést teszi az átmeneti réteggel kapcsolatban:

„The magnified micrographs that are inset in Figure 1(c) and (d) show that the Al particles are well connected and bonded with the CMs and Al matrix."



A cikkben leírt felvétel

A [83]-as jelzetű cikk húzás esetére teszi az alábbi megállapítást az átmeneti réteggel kapcsolatban:

[3.1] „The bonding between the microspheres and the Al alloy matrix is mechanical and not very strong.”

A fentiekből látszik, hogy a [82, 83] hivatkozások az átmeneti réteget kvalitatív módon említik, részletes tárgyalásuk, vagy hatásuk részletezése, elemzése az említett publikációkban nem található.

„A gömbhéj-méret növelésének hatását az egy nagyságrenddel eltérő átmérőjű SL és GC típusú gömbhéjak alkalmazásával készített Al99,5 mátrixú habokon vizsgálta. Emellett még a minták karcsúságának hatását is elemezte. Nem világos, hogy a GM gömbhéjakkal (vas-gömbhéjak) erősített kompozitra vonatkozó adatok miért szerepelnek az 5.2 ábrában.”

Az 5.2. ábrában bemutatott feszültség – alakváltozás diagram mind a nagyobb átmérőjű kerámia gömbhéjakra, mind pedig a fém gömbhéjakra jellemző (nagyon hasonló menetű) képet mutat.

„A kiválóan keményedő AlMgSi1 és AlCu5 mátrixú habok mechanikai tulajdonságai a kikeményítés hatására csak lényegesen kisebb mértékben javultak (10-15%), mint az várható lenne. Ezt a változást túl kicsinek tartja Jelölt, és magyarázatul a (3.2) egyenlet szerinti reakció lejátszódását említi. Kérem ennek részletesebb kifejtését, és a kérdéses ötvözet lágyított, edzett, befagyasztott (edzett, quenchelt) és kikeményített állapotban tömbi mintákon mérhető mechanikai jellemzőinek összehasonlítását.”

A kérdéssel kapcsolatban a dolgozatomban így fogalmazok: „A kiválasztott keményítésnek alávetett AlMgSi1 és AlCu5 mátrixú szintaktikus fémhaboknál a nyomószilárdság $\sim +10\%$ és $\sim +15\%$ mértékben növekedett (az oldó hőkezelt darabokhoz képest), a növekedés mértéke elmaradt a várakozásoktól. Ennek oka a 3.2. egyenlettel leírt reakció, amelynek lefolyása során a mátrixanyagba Si oldódhat (mivel $\sim 600^\circ\text{C}$ -on az alumínium Si oldó képessége $\sim 1,5\%$ [119], a Si eutektikum formájában is megjelenhet) [63]. A mátrixanyag kémiai összetételének megváltozásával ugyanakkor megváltoznak a T6 hőkezelés ideális hőmérséklet és idő paraméterei, aminek okán a mért tulajdonságok változásai elmaradnak a várttól.”

Az AlCu5 és AlMgSi1 alapanyagok mechanikai tulajdonságai különböző állapotokban

Anyag	$R_{p0,2} - O$	$R_{p0,2} - T6$	Növekmény	$R_m - O$	$R_m - T6$	Növekmény
AlMgSi1*	85 MPa	240 MPa	282%	125 MPa	280 MPa	224%
AlCu5**	97 MPa	410 MPa	423%	190 MPa	480 MPa	252%

*<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2813> – 2a és 2e táblázat

**ASM Handbook vol.2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International (1990) USA, 249. oldal

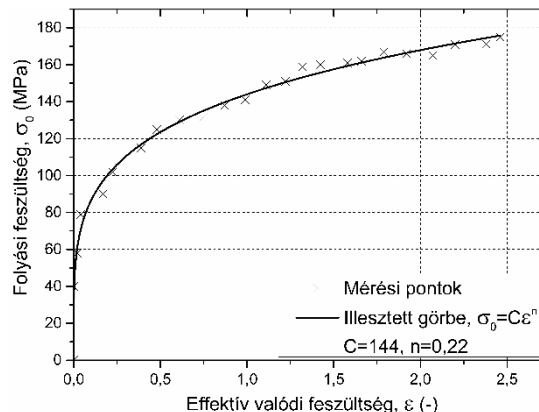
„A következő, 5.4. fejezetben nyomó vizsgálati görbék matematikai elemzésével foglalkozik Jelölt. A több részre tagolódó alfejezet bevezető mondataiban röviden ismerteti az alfejezet tartalmát, de itt – a címmel ellentétben – már a modellezés kifejezést használja. Ezzel kapcsolatban, illetve az egész alfejezetre vonatkozóan kérem Jelölt véleményét, hogy az alkalmazott leírási módot milyen szintű modellezésnek tartja?

Az 5.4.1. pont a különböző mátrixanyagok, SL 300 típusú gömbhéjjal erősített habok nyomóvizsgálati diagramjainak matematikai leírásával, a diagramok kategorizálásával foglalkozik. Az alpont tartalmának megismerése után úgy gondolom, hogy a matematikai leírás fogalmának használata lenne helyesebb, mint a modellezése.”

Valóban, az alkalmazott leírás pusztán matematikai leírás, a „modellezés” kifejezés óvatlanságból fakadóan maradt a dolgozatban.

„Az alumínium- illetve alumínium-ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabok, mint kompozit anyagok zömítő vizsgálat során érvényesülő tulajdonságainak megvilágítását jól szolgálta volna, ha a kompozit nyomóvizsgálati diagramja mellett a mátrix és az erősítő anyag megegyező értelmű diagramjai is fel lennének tüntetve. Kérem ennek pótlását, pl. az Al99,5-SL300 anyagra nézve!”

Az Al99,5 ötvözet nyomásra vett folyási görbáját 1 s^{-1} alakváltozási sebességre kimérve az alábbi diagram mutatja be [Reé A.: Flow curves related to constant strain rate. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 16 (1972:1) 39-45].



Az Al99,5 ötvözet nyomásra vett folyási görbéje, 1 s^{-1} alakváltozási sebesség mellett [Reé A.: Flow curves related to constant strain rate. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 16 (1972:1) 39-45] nyomán

A gömbhéj nyomógörbáját ábrázolni különösebben nincs értelme, mert a vizsgálata csak a fémhabban viselt igénybevételeitől jelentősen eltérő módon (pl. sík lapok között) oldható meg (a kerámia gömbhéjak rideg viselkedést mutatnak sík lapok közötti nyomás esetén).

„A szintaktikus fémhabok effektív (tényleges) rugalmassági modulusával kapcsolatban számos elméleti és mérés technikai kérdés vetődik fel. Ezekre kapunk választ az értekezés 5.5. alfejezetében, ahol Jelölt követi a kompozitok effektív rugalmassági modulusára vonatkozó, általánosan elfogadott definíciót. Mivel az effektív rugalmassági modulus lényegében deformáció nélküli viszonyokra értelmezzük, kérdésem arra vonatkozik, hogy a rugalmas alakváltozás és a feszültség kapcsolatát milyen matematikai összefüggéssel lehet kifejezni a definíció fgyelembe vételével?”

Tökéletesen rugalmas állapotban, homogén anyagok esetén a feszültség – alakváltozás kapcsolatot az általános Hooke törvény írja le. Ez érvényes az effektív rugalmassági paraméterekre is. Effektív rugalmassági modulus alatt értem itt annak a testnek a rugalmassági modulusát, amely a vizsgált kompozitot homogén, izotrop testként helyettesíti

„Az akusztikus jelek egyes klaszterei az alakváltozás jellegzetes szakaszaihoz kapcsolhatók. A hozzárendeléssel kapcsolatban azt kérdezném, hogy az ilyen mérések során szerzett tapasztalatok mellett milyen konkrét adatok szolgáltak az összerendezés alapjául?”

Az akusztikus jelek konkrét elkülönítése és klaszterekbe sorolása statisztikai alapon zajlott. Az egyes klaszterekhez kapcsolt mechanizmusok hozzárendelése a következő lépésekben történt.

1. Megfigyeltük, hogy a klaszter előfordulásának növekedése milyen feszültség és / vagy alakváltozás értékhez tartozott (például a dolgozatban 5.12a. ábrán szereplő klaszter biztosan a zaj, mert már a mérés elkezdése előtt detektálható volt).

2. Elemeztük a rögzített spektrális teljesítménysűrűség (PSD – power spectral density) jellemzőit, mint például az energiáját, frekvencia eloszlását stb. A zaj és a diszlokáció mozgás például tipikusan alacsony frekvenciájú jeleket bocsátanak ki.

3. A jelelemzés mellett a rendelkezésre álló adatokat összevetettük a kamerás felvételekkel, illetve a nyomóvizsgálati görbékkel.

A dolgozatban közölt eredményeken és leírásokon kívül lásd még a [13] Kádár Cs, Máthis K, Orbulov IN, Chmelik F. Monitoring the failure mechanisms in metal matrix syntactic foams during compression by acoustic emission. Materials Letters 173 (2016) 31-34. publikációt.

„A Timoshenko-féle rúdelmélet alkalmazásával felírt parciális differenciálegyenlet megoldásával jut el Jelölt a keresett mérőszámhoz. Eredményeit az 5.7. táblázat foglalja össze. Ebben a táblázatban szívesen láttam volna az erősítő anyag rugalmassági modulusára vonatkozó adatot is, mert ezzel együtt válhatott volna teljessé a mátrix tömbi állapotban mért és a szintaktikus hab rugalmassági modulusának összehasonlítása. Kérdésem továbbá, hogy az értekezésben ismertetett eljárás mellett alkalmaznak-e más eljárásokat az effektív rugalmassági modulus meghatározására? Kérem véleményét a Double through-transmission bulk wave method for ultrasonic phase velocity measurement and determination of elastic constants of composite materials című, a The Journal of the Acoustical Society of America 91 (1992) 3303 cikkben foglalt eljárásról!”

Dolgozatomban az effektív rugalmassági modulus meghatározására három módszert említettem (i) rezgéstani alapokon (modális analízis) nyugvó módszer, (ii) rugalmasságtani alapokon nyugvó analitikus módszer és (iii) végeselemes módszer.

A rugalmasságtani számításokhoz szükség van a gömbhéjak falanyagának rugalmassági modulusára, amelyet abból kiindulva, hogy vegyes oxidokról van szó (Al_2O_3 és SiO_2 keveréke) 190 GPa-nak vettünk fel.

A hivatkozott cikk [Rokhlin SI, Wang W: Double through-transmission bulk wave method for ultrasonic phase velocity measurement and determination of elastic constants of composite materials. The Journal of the Acoustical Society of America 91 (1992:6) 3303-3312.] az ultrahang terjedési sebessége alapján vezeti le az anyagok rugalmasságtani paramétereit és szemlélteti a módszer alkalmazhatóságát egy polimer alapú kompoziton. A megközelítés érdekes és minden bizonnyal alkalmazható a szintaktikus fémhabokon is. Ugyanakkor fenntartásaim vannak a gömbhéjak üregeességének hatásával kapcsolatban (erőteljes csillapítás).

„A szintaktikus fémhab minták geometriai modelljének létrehozását elismerésre méltó eredménynek tartom. A rugalmassági modulus meghatározása céljából az MSC Marc Mentat programmal végzett futtatást. Ebben a súrlódási viszonyokra vonatkozó, az önmagával való, tehát a mátrix és az erősítőanyag közötti interakció során „glue” beállítást választott, tehát tapadást adott meg. Kérem ennek részletesebb kifejtését, mit jelent ez a mátrix és az erősítő anyag közötti kapcsolatra nézve!”

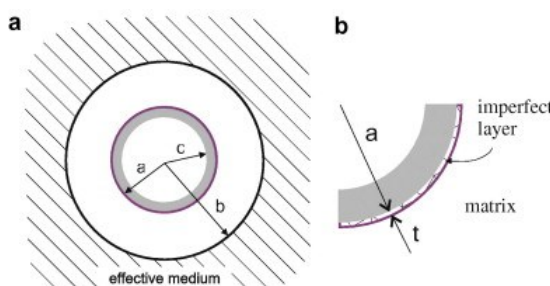
A „glue” kondíció a tökéletes tapadásnak felel meg, tehát minden csomóponti elmozdulást, erőt stb. egy az egyben visz át, vagyis röviden: „tökéletes” átmeneti réteget feltételez.

„A végeselemes analízisen alapuló, eljárással az 5.5.2 pontban már közölt adatokkal jól egyező eredményekre jutott. A tényleges rugalmassági modulus analitikus modellekkel történő meghatározásával az 5.5.4. pont foglalkozik. A figyelembe vett modellek a lineáris homogenizációs eljárások közé tartoznak. A már korábban említett Bardella és Marur modelljének bemutatásakor Jelölt megemlíti, hogy kompozit gömbhéj modellekben az egyébként háromfázisú rendszer kiegészül egy

negyedikkel, amelyet a mátrix és a gömbhéj közötti átmeneti réteg jelenti. Kérdésem, hogyan kell ezt értelmezni, és ebben az esetben hogyan jellemezhető a modell típusa?”

Az átmeneti réteg a szintaktikus fémhabok rugalmasságtani paramétereinek meghatározását célzó [120-127] publikációkban megemlítésre kerül, általában mint „perfect interface”, ami tökéletes kapcsolatot feltételez a mátrixanyag és a gömbhéjak között. Kifejezetten az átmeneti réteg modellekbe történő beépítésével és vizsgálatával Marur [126] jelű publikációja foglalkozik [Marur PR. Influence of imperfect interface on the elastic moduli of syntactic foams. Computational Materials Science 46 (2009) 327-332.].

A modellben az átmeneti réteget egy, a gömbhéj sugaránál (a) jóval vékonyabb (t), elhanyagolható vastagságú ($t \ll a$) réteggel modellezi (lásd az ábrát).



Az átmeneti réteget tartalmazó modell [Marur PR. Influence of imperfect interface on the elastic moduli of syntactic foams. Computational Materials Science 46 (2009) 327-332.] nyomán

Az átmeneti réteget a gömbi koordináta rendszer radiális és tangenciális feszültségkomponenseinek kontinuitását leíró egyenletekben veszi figyelembe egy ξ és χ paraméterrel, amelyek értéke 0 és ∞ között változhat ((6)-os egyenlet a publikációban). A paraméterek ∞ értéke a tökéletes átmeneti réteget, 0 értéke az átmeneti réteg teljes hiányát (tökéletes dekohéziót) valósítja meg. Minden 0 és ∞ közé eső érték pedig egy tökéletlen átmeneti réteget ír le.

„Elismerve az effektív rugalmassági modulus meghatározására irányuló törekvések elméleti jelentőségét, arra kérem Jelölt válaszát, hogy ennek a mechanikai mérőszámnak milyen mérnöki alkalmazásban (pl. méretezés) van szerepe?”

Az elméleti érdekességen kívül olyan ritka mérnöki alkalmazásokban lehet szerepe, ahol a fémhabok igen kis terhelések érik és az anyag a valós rugalmassági modulusát adja válaszul, aminek ismerete feltétlenül szükséges. Ilyennek képzelhető például egy üreszköz tükrének tartója, ahol követelmény a kontrollált hőtágulás, a kis önsúly és a nagy fajlagos merevség és annak minél pontosabb értéke.

„A vizsgálati eredményeket az 5.6.1. pontban ismerteti. Érdekes megfigyelést tesz a reaktív és a nem reaktív gömbhéjak és a mátrixanyag között kialakuló határréteg vastagságával és az ott kialakuló elemeloszlással kapcsolatban. Várakozásommal ellentétben a GM gömbhéjaknál vékonyabb átmeneti réteget detektált Jelölt EDS technikával, mint a GC gömbhéjaknál.

Kérdésem ennek a megfigyelésnek az értelmezésére vonatkozik. Kérdésem továbbá az, hogy az EDS technika mellett vagy azon túl milyen technikát lenne célszerű alkalmazni az átmeneti réteg – akár nagyobb felbontású – vizsgálatára?”

Az átmeneti réteg vastagsága az elemek változásának függvényében került leolvasásra, ennek módszere szubjektív, így a dolgozatban említett 5 μm -es (GM gömbhéjaknál), illetve 7 μm -es

(GC gömbhéjaknál) azonosnak tekinthető. A GM gömbhéjak esetében a vékonyabb átmeneti réteg kialakulásában szerepe lehet annak, hogy a gömbhéjak felülete kismértékben oxidálódott, ahogy azt a vonalmenti EDS 5.20. ábrájának bal alsó sarkában megfigyelhető O csúcs jelzi.

Az átmeneti réteg további vizsgálatára alkalmas lehet a transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM), illetve annak nagy felbontású változata (HRTEM). Ennek térbeli felbontás határa FEG ágyúval 1-2 nm, termikus ágyúval 10-20 nm [Transzmissziós elektronmikroszkópia, ELTE, <http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/TEM.pdf>].

„A TEM-ben is gyakori analitikai feltét az EDS. A nyaláb a TEM-ben is fókuszálható egy pontba, így például lokális összetételmérés végezhető. További analitikai lehetőség a vékony mintán áthaladó elektronok energiáját analizáló elektron energia veszteségi spektrométer (EELS=electron energy loss spectrometer) opcionális felszerelése. Kombinált készülékek (úgynevezett analitikai elektronmikroszkópok=AEM) is léteznek, amelyeknél az analitikai feltéten (EDS, EELS) kívül pásztázási lehetőséget is biztosítanak a vékony minták vizsgálatához. Képi üzemmódban a legjobb minőségű TEM lényegében atomi felbontású, azaz az úgynevezett pontfeloldás 0,14-0,4 nm. Az ilyen TEM neve HRTEM (high resolution electron microscope). Analitikai EDS üzemmódhoz lényegesen nagyobb áram szükséges, így a fókuszált nyalábbal végzett EDS analízis térbeli felbontásának határa téremissziós ágyúval (FEG=field emission gun) 1-2 nm, míg termikus katódú ágyúval 10-20 nm. A minta vastagságának növekedtével (a mintán belüli elektronszórások miatt) az analízis térbeli felbontása rohamosan romlik (növekszik). A csak rendkívül vékony mintán végezhető EELS analízis térbeli felbontása téremissziós forrás esetén megközelíti a képi üzemmódot.” [Transzmissziós elektronmikroszkópia, ELTE, <http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/TEM.pdf>]

„A méretüket tekintve nagyságrendileg különböző méretű, de anyagukat tekintve megegyező SL és GC gömbhéjakkal erősített, AlSi12 mátrixú szintaktikus fémhabok vizsgálati eredményeiről az 5.6.2 pontból tájékozódhatunk. A minták előállításakor 65%-os térkitöltést állítottak be. Kérdésem, hogyan lehetett ezt eltérő átmérők esetén biztosítani?”

A gömbhéjak 2:1 térfogatarányban kerültek összekeverésre. 2006-os cikkében Furnas nyomán Brouwers [Brouwers HJH: Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings, Physical Review E 74 (2006) 031309] kimutatta, hogy a nagyobb (d_L) és kisebb (d_S) gömbhéjak átmérőjének arányában (d_L/d_S) mekkora a közöttük elhelyezkedő üres tér térfogataránya (h). Ez az esetünkben jellemző ~10-es aránynál 0,328-ra adódott (I. táblázat), vagyis a gömbhéjak térfogataránya elméletileg 67,2%. Ennek felel meg a dolgozatban szereplő ~65%-os térkitöltés, feltételezve a nem tökéletes szerkezetet (lásd 5.31. ábra).

„Ellentétben az 5. fejezettel, az értekezés utolsó három fejezete egy-egy szűkebb témakört dolgoz fel. A 6. fejezet a növelt alakváltozási sebességű zömítő vizsgálat eredményeit mutatja be. Hiányolom a kísérleti technika részletes bemutatását, a mért terhelés-alakváltozás diagramok közlését. A nagy alakváltozási sebességű zömítő vizsgálatok elvégzését a szintaktikus fémhabok egyik lehetséges alkalmazási területével indokolja.”

A kísérleti technika leírását a 3.2 fejezetben (Vizsgálati módszerek) közlöm: „A nagy alakváltozási sebességű méréseket split-Hopkinson módszerrel hajtottuk végre. Az átvívó (transmission bar) és továbbító rúd (incident bar) is C350 jelű nagyszilárdságú acélból készült. A rudak hossza és átmérője rendre 1,8 m és $\varnothing 19,05$ mm volt. A létrejövő feszültség hullámok

felerősített jeleit egy PicoScope oszcilloszkóp gyűjtötte össze. A 72,2 mm hosszúságú ütőrúd (strike bar) egy nyomáskamrából lehet működtetni, amelyben 138 vagy 552 kPa nyomás volt beállítható. Az adott nyomásokkal működtetett ütőrúd a minta 933, illetve 2629 s⁻¹-os alakváltozási sebességű zömítését eredményezte. A próbatestek hengeresek voltak és a mérőberendezés specifikációinak megfelelően Ø12,7 mm-es átmérővel és magassággal (H/D=1) készültek. A méréseket a kvázi-statisztikus zömítésekhez hasonlóan anyagféleségekként hat mintán végeztük el, az eredményeket átlagoltuk és tapasztalati szórásokat számítottunk. A mérések során rögzített mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbéket a szabadzömítésével megegyező karakterisztikus jellemzők feltüntetése mellett a 3.4. ábra mutatja be, összevetve a kvázi-statisztikus körülmények között rögzített görbékkel.”

A mért terhelési görbékre – követve a dolgozat struktúráját – tipikus példát hoztam, amelyet összevetve a kvázi-statisztikus szabadzömítés jellegzetes görbéjével a 3.4. ábra mutat be. A továbbiakban a mérési eredmények kiértékeléséből származó karakterisztikus mechanikai jellemzőit elemeztem.

„A szintaktikus fémhabok karakterisztikus mechanikai jellemzőinek alakváltozási sebesség-függését jellemző érzékenységi paramétereit összefoglaló 6.1. táblázatot értékes összeállításnak tartom, és szívesen olvastam volna néhány értékelő mondatot. Kérdésem arra vonatkozik, hogy a változatos adatok mögött milyen rendező elvet lehet felismerni, gondolva például a mátrix folyási határának alakváltozási sebesség-érzékenységre. A lehetséges alkalmazási terület miatt a szerkezeti merevségben tapasztalt javulást fontos eredménynek tartom.”

A fémhabok sebesség érzékenységi paraméterére elsősorban a mátrixanyag van hatással, ahogy azt Balch és szerzőtársai is megerősítik [70]. Ennek megfelelően a sebességérzékenységi paraméternek a mátrixanyag szilárdságának növekedésével csökkenő trendet kellene mutatnia. Ugyanakkor – feltehetően a szintaktikus fémhabok különleges szerkezete miatt – ez nem minden esetben mutatkozott meg ennyire határozottan.

A növelt alakváltozási sebességű nyomóvizsgálatokkal kapcsolatban. „A törési energia szinte változatlan értéke ugyanakkor kedvezőtlen. A teljes folyamat alatt elnyelt energiát a mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozási diagram numerikus integrálásával határozták meg. Kérdésem, hogy az ehhez szükséges adatok milyen formában álltak rendelkezésre?”

A mérési adatok a berendezés által rögzített, mért eredményeket tartalmazó táblázatok és abból származtatott diagramok formájában álltak rendelkezésre. Feldolgozásuk egy diagramkezelő és elemző szoftver segítségével történt.

„A 6.3. alfejezetben Jelölt a kvázistatisztikus és a nagy alakváltozási sebességű zömítéskor fellépő tönkremeneteli mechanizmusokat hasonlítja össze és elemzi azokat. A 933s⁻¹ és a 2629s⁻¹ alakváltozási sebességgel végzett alakítás során lejátszódó mikroszerkezeti változásokat folyamatukban követni nem volt mód, és így csak a zömítés végén elért alakváltozásnak megfelelő állapotú mintákat vizsgálhatta. A kétféle alakváltozási sebességű zömítés során elért alakváltozás mértéke számottevően eltért egymástól, ezért a mintában bekövetkező eltéréseket nem csak az alakváltozási sebesség eltérő volta magyarázza, így az összehasonlítás problematikus. Például a nagyobb, 8,12% teljes alakváltozás miatt az eltérések még szembetűnőbbek, Jelölt megfigyelte, hogy a nagyobb, hosszirányú repedések mentén a gömbhéjak kiperegtek. Kérdésem, hogy ez a megfigyelés hogyan egyeztethető össze az átmeneti réteg meghatározó szerepére vonatkozó állítással?”

A tönkremenetel mechanizmusában elsősorban a lökéssel bevitt energia van meghatározó szereppel, amely (mivel a gép rudazata azonos) közvetlen kapcsolatban van a beütő rúd sebességével és így az alakváltozási sebességgel.

Az alakváltozást ugyan nem mikroszerkezeti szinten, de folyamatában megfigyeltük gyorskamerás felvételekkel, ekkor volt mód megfigyelni a gömbhéjak kipergését is, amelyet a jóval nagyobb alakváltozásnak tudok be. Ekkora alakváltozások és lökésszerű terhelés esetén az átmeneti réteg szerepe leértékelődik. Emellett a lökés során a gömbhéjakban lévő gázok megnövekvő nyomása is eltávolítani igyekszik a felületen lévő gömbhéjakat.

„A 7.1. alfejezetben meglepően kisszámú publikációt ismertet. A publikációk kis számát nem a kísérleti technika nehézségeivel magyarázza, hanem sokkal inkább az igénybevétel nehezen definiálható voltával. Kérdezem, hogy a kerámia gömbhéjakkal erősített habok vizsgálatáról szóló két publikáció szerzői hogyan oldották meg a radiális irányban gátolt zömítést, és az általuk alkalmazott megoldás és Jelölt megoldása megegyezik-e, vagy sem?”

Kiser és szerzőtársai [139] nem közöltek vázlatot a radiális irányban gátolt zömítés megvalósításáról. Cikkükben így fogalmaznak:

[3.2] „The materials were tested in uniaxial compression using cylindrical specimens with an aspect ratio of 2:1. The specimen diameters were 12 and 17.5 mm in the A201 and A360 alloy materials, respectively.”

...

„Constrained compression tests were conducted on similar cylindrical specimens contained within a cylindrical steel die with an inner diameter that was essentially equivalent to the specimen diameter. A high pressure MoS₂ lubricant was used to reduce the sliding resistance of the specimen/die interface. The nominal axial strains were calculated from the actuator displacement and the initial specimen length, taking into account the displacements within the testing machine.”

A leírásból úgy gondolom, hogy a módszer megegyezik az általunk alkalmazottal. A másik szerző páros, Tao és Zhao [83] sem közöl vázlatot a radiális irányban gátolt zömítésről, leírásuk hasonlóan tömör:

[2] „The uniaxial quasi-static confined and unconfined compression tests were carried out on cylindrical samples of a length about 24 mm and a diameter of 19 mm for the confined tests and 21 mm for the unconfined tests. In each confined test, the sample was contained within a cylindrical steel tube with its inner diameter equal to the sample diameter.”

A leírás alapján ez is megfeleltethető az általunk alkalmazott eljárásnak.

„Kérdezem, hogy tömörödési alakváltozás és a gömbhéjak üregtérfogata között milyen összefüggést tapasztalt? A porozításnak milyen szerepe van?”

A tömörödési alakváltozás porozításhoz való viszonyát a dolgozatomban nem vizsgáltam. A GC és SL gömbhéjak minden esetben unimodális eloszlásúnak és a gyártási technológiát tekintve azonos térkitöltésűnek feltételezhetők és mivel falvastagságuk közel azonos, így üregtérfogatuk is azonosnak feltételezhető, habár az üregtérfogat térbeli eloszlása jelentősen eltér.

A jelentős eltérés a tömörödési alakváltozásban annak tudható be, hogy a GC kerámia gömbhéjak ellenállóbbnak bizonyultak és nem roppantak össze, míg az SL gömbhéjak összeroppantak és ellapultak az adott erőhatás alatt (lásd a 7.9. ábrát).

„A 7.3. alfejezetben a zömítés jellegének a tönkremeneteli módra gyakorolt hatását elemzi Jelölt. A szabad zömítéskor kialakuló hordósodás mértékét figyelembe lehetett volna venni a radiális irányban gátolt zömítő vizsgálat során kialakuló háromtengelyű feszültségállapot jellemzésekor. Fontos, hogy gátolt zömítéskor az erősítő anyagtól független a tönkremeneteli mód, ellentétben a szabad zömítéssel. Jelölt itt nyilván a gömbhéj méretére gondolt. Kérdezem továbbá, hogy talált-e publikációt a kerámia gömbhéjakkal erősített fémhabok hidrosztatikus nyomás hatására bekövetkező károsodására nézve?”

Igen, a tönkremeneteli mód jellege nem függ az erősítőanyagtól. Adott nyomóerő szintjéig azonban a tönkremenetelben nem egyforma szintre jutnak el (lásd az előző kérdést és választ).

A szintaktikus fémhabok hidrosztatikus nyomás hatására bekövetkező károsodásával foglalkozó publikációval eddig nem találkoztam.

„Motz csoportjának munkája [160] a fáradásos repedés terjedésének törésmechanikai elemzésével foglalkozik, részben gömbhéj-struktúrájú anyagokban. A Paris-Erdogan összefüggésben szereplő kitevőre meglepően nagy értéket kaptak. Kérdésem, hogy a mérés technikát elég kiforrottnak tartja-e a kitevő meghatározására?”

A hivatkozott [160] cikkben leírt mérés technikát meggyőzőnek tartom. A repedés hosszát feszültségeséses módszerrel mérték, amelynek pontosságát optikai mikroszkópos vizsgálatokkal erősítették meg. A szerzők megjegyzik, hogy Olurin és szerzőtársai [159] még nagyobb Paris-Erdogan kitevőt mértek ($m \approx 20$), hasonló mérés technikával. Az egyenlet kitevője lényegében azzal van kapcsolatban, hogy a feszültségintenzitási tényező tartomány változásának függvényében milyen gyorsan nő a repedés. A nagy kitevő gyors növekedést jelez. Ez beleillik a fémhabok viselkedésébe, mivel a repedés mindig a leginkább kritikus helyen jelenik meg és a legkisebb ellenállás irányába halad, amely a fémhabok esetében bonyolult töretfelülethez vezet. Megjegyzem, hogy ez nem konform a szokásos vizsgálati eljárással, amely szigorú előírásokat tartalmaz például a repedés síkjára vonatkozóan. További megjegyzésem, hogy szintaktikus fémhabokra tudomásom szerint ezidáig nem áll rendelkezésre ilyen adat.

„A 8.2. alfejezetben mutatja be Jelölt a mátrix anyagának és a gömbhéjak átlagos méretének a szintaktikus fémhabok fárasztóvizsgálat közbeni viselkedésére gyakorolt hatását. A vizsgálatok célja a szintaktikus fémhabok Wöhler-görbéinek meghatározása ciklikus nyomó igénybevétel esetére. A Wöhler-görbe két jellegzetes szakaszának meghatározása gondosan megtervezett és kivitelezett kísérleti és értékelő munkát bizonyít.

Az élettartam szakaszból és a határkifáradási szakaszból álló Wöhler-görbékkel kapcsolatos kérésem, hogy a két mátrixanyagra vonatkozó hasonló értelmű görbét vesse össze a szintaktikus fémhab megfelelő görbéivel. Milyen hasonlóság és eltérés figyelhető meg, és mivel magyarázható az eltérő jelleg?”

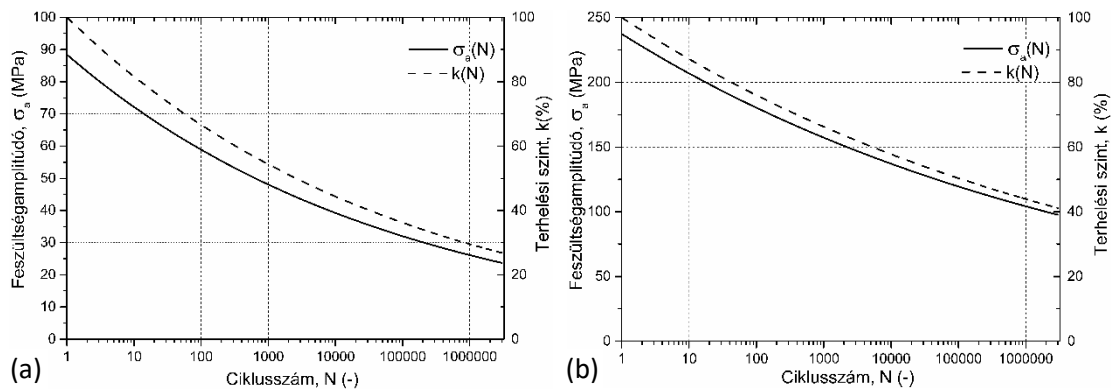
Az Al99,5 és AlSi12 ötvözetek Wöhler görbáját az alábbi diagramok mutatják be, mind feszültségamplitúdó, mind pedig terhelési szint viszonylatában.

Az adatok forrása az Al99,5 anyagra Boller C., Seeger T (szerk): *Materials Data for Cyclic loading Part D: Aluminium and titanium alloys*, Elsevier Science Publisher B. V., Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo (1987) p. 168.

$$R_m=73 \text{ MPa}, \sigma'_f=94 \text{ MPa}, b=-0,0883$$

Az adatok forrása az AlSi12 anyagra a FémAlk ZRt. mérési adatai (ezt illetően köszönettel tartozom Szalva Péter PhD hallgatónak).

$$R_m=255 \text{ MPa}, \sigma'_f=247 \text{ MPa}, b=-0,05957$$



Az Al99,5 (a) és az AlSi12 (b) ötvözetek Wöhler görbéje

A legszembetűnőbb különbség az, hogy a mátrixanyag ötvözeteknek nincs kifáradási határuk (ahogy az megszokott az alumínium ötvözeteknél).

Habár ezzel a ténnyel a vizsgálatok kiértékelésénél tisztában voltunk, a szakirodalomra támaszkodva megalapozottnak tartjuk az élettartam szakasz egyenessel történő közelítését és a kifáradási határ lépcsős módszerrel történő meghatározását a mérnöki értelemben elfogadhatónak tartott $2 \cdot 10^6$ ciklusszámhoz tartozóan. Ezt alátámasztják a szakirodalmi részben említett publikációk, amelyek közül az összes releváns publikáció egyenes illesztését javasolja az élettartam szakaszra [145, 147-151, 154, 155, 157, 158, 163]. Kifáradási határt határoz meg a [145]-ös publikáció (5. ábra), a [154]-es publikáció (7. ábra, 10^9 ciklushoz), a [157]-es publikáció (4. ábra, 10^7 ciklushoz), a [158]-as publikáció (6. ábra, 10^6 ciklushoz) és a [163]-as publikáció (2. és 3. ábra).

A kifáradási határ megjelenése a 10^6 - 10^9 tartományban valószínűleg a fémhabok szerkezetével magyarázható, a cellák közötti vékony falak a névleges terhelésnél nagyobbak vannak kitéve, így repedések alakulhatnak ki, amelyek a későbbiekben terjednek, ezzel okozva a fémhab végleges tönkremenetelét.

„A fárasztó vizsgálatok után elvégzett metallográfiai vizsgálatok alapján két jellegzetes tönkremeneteli mechanizmust lehetett azonosítani, az erősítő anyag átmérőjétől függően. Kiemelem a metallográfiai felvételek kiváló minőségét, ami nagymértékben hozzájárult a helyes következtetések megfogalmazásához. Nem értem, hogy a 8.8. ábrához fűzött magyarázatban mit jelent a mátrix anyag mikropoláros viselkedése?”

A mikropoláros viselkedés azt takarja, hogy a korrekt mechanikai leírásnál szerepe van az anyagban ébredő nyomatókoknak is és nem csak az erőeknek.

„A 8.10. ábrához fűzött magyarázatban a következő megfogalmazás szerepel: a gömbhéjak deformációja a deformálódott és törött gömbhéjak határa. Mit jelent a gömbhéjak deformációja?”

A dolgozatomban a következő megállapítás szerepel: „A próbatest teljes alsó (a képen jobb oldali) felén jól kivehetők a deformálódott és törött gömbhéjak, amelyek a tömörödési sávhoz tartoztak.”. Itt helytelenül szerepel a „deformálódott” szó, hiszen a kerámia gömbhéjak nem képesek lényegi deformációra. A fogalmazás közben a törött gömbhéjak torzult, átrendeződött mivoltára, illetve eredeti üregük deformált alakjára szerettem volna hivatkozni.

A továbbiakban az opponensi vélemény végén kiemelt kérdéseket válaszolom meg.

„Hogyan érvényesül a mátrix és az erősítő anyag közötti átmeneti réteg meghatározó szerepe a szintaktikus fémhabok karakterisztikus mechanikai jellemzőiben?”

Az átmeneti réteg felelős a terhelésátadásért a mátrixanyag és a gömbhéjak között, így minden karakterisztikus jellemzőre jelentős hatással van, ám ezt a hatást számszerűsíteni az átmeneti réteg erősségének meghatározására irányuló konkrét mérési eredmények hiányában – egyelőre – nem lehetséges. A megfelelő átmeneti réteg esetén valószínűsíthető meg a szintaktikus fémhabok leghatékonyabb anyagkihasználása, abban az esetben, ha a mátrixanyag és a gömbhéjak tönkremeneteli feszültsége azonos [70]. Hibás, vagy elégtelen átmeneti réteg esetén a terhelésátadás nem, vagy csak korlátozottan valósul meg, ez a gömbhéjak merevtestszerű mozgásához, a mátrix és a gömbhéj elválásához vezethet, ami a szilárdsági jellemzőket és az energiaelnyelést is csökkenti.

„Az átmeneti réteg szerepén túlmenően a szintaktikus fémhabok karakterisztikus mechanikai jellemzőit a mátrix és az erősítő anyag tulajdonságai egyaránt befolyásolják. Kérem Jelöltet, hogy a vizsgált mechanikai jellemzőket csoportosítsa aszerint, hogy az adott mechanikai jellemzőt a kompozit melyik összetevőjének tulajdonságai határozzák meg elsősorban! Megfogalmazható-e a csoportosítás rendező elve?”

A szintaktikus fémhabok karakterisztikus mechanikai jellemzőit részben az igénybevétel módja határozza meg.

Kvázi-statisztikus szabadzömítés esetén a nyomószilárdság, a törési alakváltozás, a szerkezeti merevség és az elnyelt mechanikai munka a karakterisztikus mechanikai jellemzők. Ezeknek a tulajdonságoknak az esetében mind a mátrixanyag, mind pedig a gömbhéjak tulajdonságai jelentős hatással bírnak. A gömbhéjak méretének és a mátrixanyag minőségének, hőkezeltiségi állapotának jelentős hatása van a nyomószilárdságra, a törési alakváltozásra és a szerkezeti merevségre (lásd 5.3. és 5.4. ábrák). Domináns hatás nem különíthető el, de összességében a gömbhéjak mérete erősebb befolyással bír. Igen jelentős, domináns hatása van ugyanakkor a gömbhéjak méretének az elnyelt mechanikai munkára (5.3. ábra).

Kvázi-statisztikus, de radiális irányban gátolt zömítés esetén a karakterisztikus mechanikai jellemzők sora kibővül a tömörödési alakváltozással. A nyomószilárdságra és a szerkezeti merevségre a gömbhéjak mérete és a mátrixanyag minősége is jelentős hatással van (7.1. ábra). A törési és a tömörödési alakváltozást illetően a gömbhéjak méretének van erőteljes hatása (7.2. és 7.3. ábrák). Ennek kapcsán a törési energiát és a teljes elnyelt energiát is a gömbhéjak mérete befolyásolja legerősebben, a mátrixanyag minősége másodlagos.

Növelt alakváltozási sebességű zömítés esetén a gömbhéjak méretét nem változtattuk, így csak a mátrixanyag minőségének hatása mérhető fel, amely összevethető nagyságrendű a kvázi-statisztikus szabadzömítésnél tapasztaltakkal (lásd 6.1. – 6.8. ábrák).

Ismétlődő nyomó igénybevétel esetén jelentős hatással volt a gömbhéjak mérete és másodlagos hatással bírt a mátrixanyag minősége (8.5. ábra).

Össességében megállapítható, hogy a szilárdsági jellegű jellemzőket mind a gömbhéjak mérete, mind pedig a mátrixanyag minősége befolyásolja. Az alakváltozás és energiaelnyelés jellegű mennyiséget a gömbhéjak tulajdonságai dominálják.

„A szintaktikus fémhabok teljesítőképességének számszerű megítélésére milyen komplex mérőszámokat szokás vagy lehet alkalmazni?”

A fémhabok teljesítőképességének jellemzésére eddig nem került bevezetésre speciális komplex mérőszám. Ennek indoka az, hogy a különböző alkalmazási területekhez más-más komplex mérőszám illeszkedne. Ezt néhány példán keresztül szemléltetem.

1. Autóipari alkalmazás – szerkezeti elem: a fajlagos szilárdság és a fajlagos merevség a legfontosabb.

2. Autóipari alkalmazás – ütközés csillapító elem: az elnyelt mechanikai munka és a sűrűség a legfontosabb (egyben is kezelhető, sűrűsége fajlagosított elnyelt mechanikai munkaként).

3. Építőipari alkalmazás – dekoratív takarófal: a fajlagos szilárdság és a fajlagos szerkezeti merevség a legfontosabb.

Remélem, hogy a fenti válaszok megfelelnek Professzor Úr észrevételeire és kérdéseire, továbbá köszönöm a tézisekről alkotott pozitív véleményét.

Budapest, 2018. február 23.



Orbulov Imre Norbert