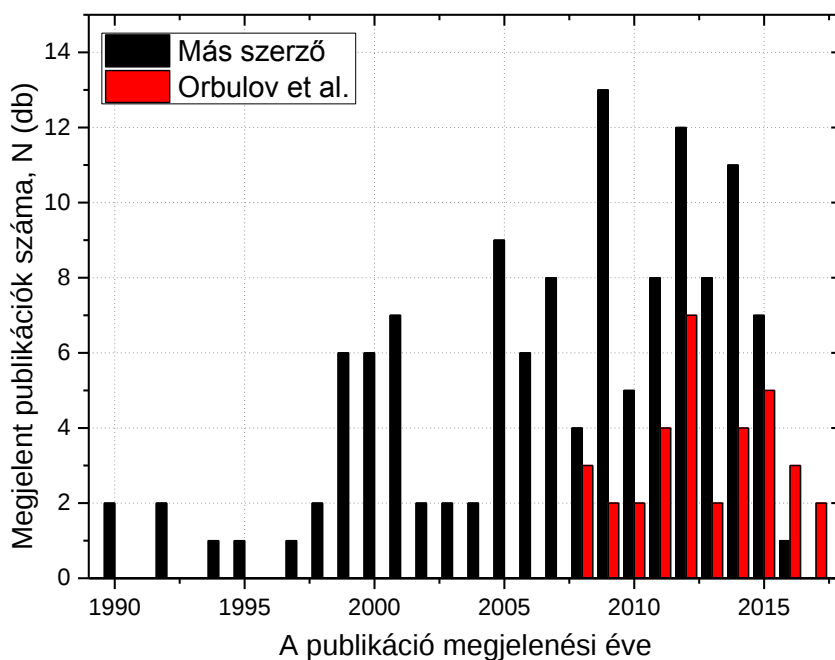


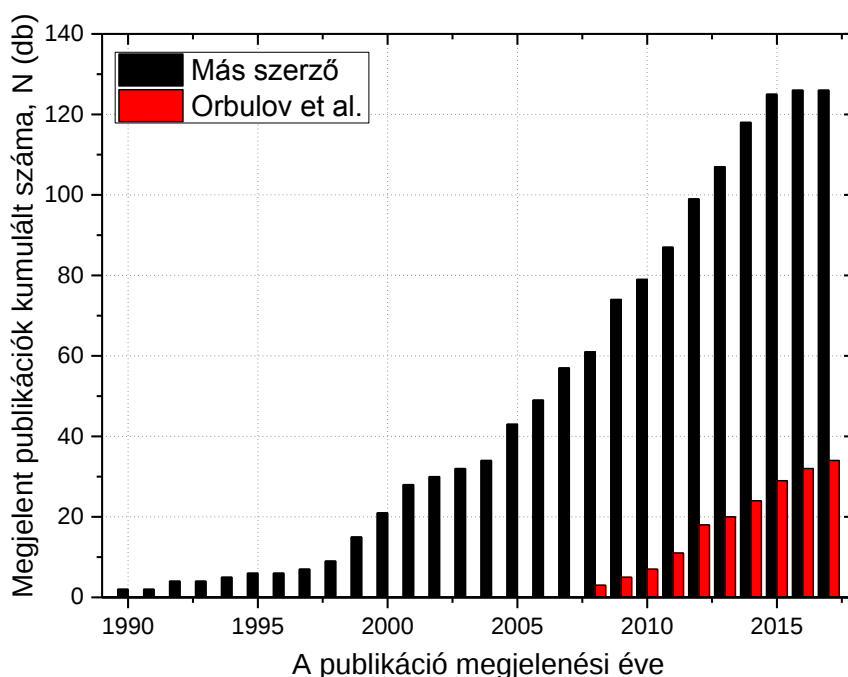
Opponensi vélemény Orbulov Imre okl. gépészmérnök, PhD *Alumínium- és alumíniumötvözet-mátrixú szintaktikus fémhabok gyártása és mechanikai tulajdonságai* című, az MTA doktori címének elnyerése érdekében benyújtott értekezéséről

Orbulov Imre a PhD fokozatának megszerzése óta az alumínium és az alumíniumötvözet-mátrixú fémhabok kutatása során elért eredményeit 124 számozott oldal terjedelmű értekezésben foglalta össze. A Jelölt témaválasztását előremutatónak tartom. A fémhabok, és ezen belül a szintaktikus fémhabok a négy lehetséges anyagcsoport közül a legnagyobb fejlődési potenciált képező kompozitok (társított anyagok) csoportjába tartoznak. A felhasználói vagy piaci igényeknek megfelelő, azokat kielégítő szerkezeti vagy funkcionális anyagoknak a tudatos fejlesztése, teljesítőképességüknek a mindenkori igényekhez való illesztése napjaink anyagtudományi kutatásainak fő irányába esik.

A témaválasztás időszerűségét és helyességét jól mutatják Jelölt szakirodalmi hivatkozásainak időbeli eloszlását szemléltető adatok. Az 1. és 2. ábra adataiból látható, hogy a saját és a más szerzőktől való publikációknak döntő része 2000 után született, és még a legutóbb figyelembe vett 2016. évi publikációk száma és aránya is jelentős.



1. ábra. Orbulov Imre értekezésében idézett publikációk időbeli eloszlása 1990-től



2. ábra. Orbulov Imre értekezésében idézett publikációk kumulált száma 1990-től

Ez azt bizonyítja, hogy a szintaktikus fémhabok témaköre jelenleg is a kutatók érdeklődésének középpontjában van. Jelölt ebben a témában írta PhD dolgozatát és habilitációs füzetének anyagát is.

Jelölt témaválasztásában meghatározó szerepet játszik az a körülmény, hogy Blücher József professzor a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékének adományozta saját kompozit-laboratóriumának eszközeit, és a tanszék rendelkezésére bocsátotta a társított anyagok gyártására vonatkozó know-how-jait.

Orbulov Imre értekezése a formai követelményeket messzemenően kielégíti, tartalmazza mindazokat az elemeket, amelyek az értekezés értékeléséhez megfelelő támpontot nyújtanak a bírálónak. A részletes tartalomjegyzék mellett megtalálható külön-külön a latin és görög betűs jelölések értelmezése és a 168 tételből álló szakirodalmi referencijegyzék, benne megkülönböztetve a saját és a más szerzőktől származó cikkeket, illetve az internetről letöltött anyagok azonosítóit is megadja.

Jelölt értekezésének törzsanyagát nyolc fejezetre bontotta, ezeket a 9. fejezet követi összefoglalásként, majd a 10. fejezet Jelölt tudományos eredményeit tartalmazza 6 tézisben megfogalmazva.

Az értekezés felépítése jól végiggondolt, a törzsanyag lényegében két nagyobb egységre bontható. Az első három fejezet egy tágabb értelemben vett bevezetésnek tekinthető, míg a további öt fejezet a szintaktikus fémhabok gyártásával, pontosabban a nyomásos infiltrációval és az előállított fémhabok egyes mechanikai tulajdonságainak meghatározására irányuló kísérletekkel és azok értelmezésével foglalkozik.

A szakirodalmi összefoglalók a 4-8. fejezetek előtt elkülönítve találhatók meg. Ez a megoldás kissé eltér a hagyományos megoldástól, de már több értekezésben talákoztam hasonló megoldással. Az

értekezést diagramok, oszlopdiagramok, fény- és pásztázó elektronmikroszkópos felvételek teszik teljessé. A szövege jól követhető, minimális számú elütés található benne.

Végül, a Köszönetnyilvánítás jól tükrözi azt az eredményes szervezőmunkát, amely lehetővé tette Jelölt számára a tervezett kutatómunkájának sikeres elvégzését.

Jelölt értekezésének szerkezete az opponensi véleményemben is visszatükröződik, követve az előzőekben megfogalmazott tagoltságot. Egy egységként kezelem az első három, majd külön-külön értékelem a 4-8. fejezetet. Jelölthöz intézett kérdéseimet is ennek megfelelően fogalmazom meg. Arra is utalnom kell, hogy Jelölt az első, Bevezetés című fejezetben szöveges és táblázatos formában is jellemzi az egyes fejezetek tartalmát, sőt az 1.1 és 1.2 táblázatban a kérdéses fejezetben ismertetett tevékenység eredményeit is közli. Úgy ítélem meg, így a bíráló eltekinthet az értekezés egyes fejezeteinek részletes tartalmi ismertetésétől, és az értekezés áttanulmányozása közben felvetődött kérdések megfogalmazására koncentrálhat.

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? Ebben a részben a szintaktikus fémhabok lehetséges alkalmazási példáiról és az adott témakörrel hazánkban foglalkozó műhelyekről és vállalkozásokról szóló információk Jelölt széleskörű tájékozottságáról tanúskodnak.

A 2. fejezet tartalmazza Jelölt célkitűzését. Véleményem szerint – az elért tudományos eredményeken túlmenően – az értekezés igazi értékét ennek a fejezetnek az utolsó bekezdése adja meg, nevezetesen az, hogy a karakterisztikus mechanikai jellemzőket saját fejlesztésű nyomásos infiltráló berendezéssel előállított mintákon határozta meg, és így erről az anyagtípusról egységes képet tudott adni.

Az értekezés célkitűzésének korai megfogalmazása miatt nem volt mód a szakirodalmi eredmények értékeléséből kirajzolódó kérdések megfogalmazására, és ezt követően a célkitűzés probléma-centrikus megfogalmazására. Jelölt megoldását ugyanakkor el tudom fogadni, hiszen egy új, viszonylag még kevésbé ismert, főleg nem azonos technológiával gyártott és nem egységes szempontok szerint vizsgált anyagcsoportról van szó.

Jelölt értekezését ezért alapvetően saját vizsgálati eredményein és azok értelmezésén alapuló monográfiának tartom. Megfontolandó az értekezés könyv alakban való megjelentetése, nyilván angol nyelven.

A 3. fejezetben – amely három alfejezetre oszlik – a felhasznált és előállított anyagokkal és az alkalmazott kísérleti módszerekkel foglalkozik Jelölt. A fejezet végén az „as cast” minták szövetszerkezetét mutatja be.

A szintaktikus fémhabok előállításához 99,5 tisztaságú alumíniumot és három szabványos alumínium-ötvözetet használt, ez utóbbiak közül kettő nemesíthető, egy pedig öntészeti célú ötvözet.

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?

Erősítő anyagként háromféle gömbhéjat – melyek közül kettő kerámia, egy pedig vas gömbhéj volt – alkalmazott. Az SL és a GC jelölésű kerámia gömbhéjak csak átmérőjükben különböznek (150 µm

illetve 1425 μm), míg a vas gömbhéj átmérője a GC jelű gömbhéj átmérőjével egyezik meg közelítőleg. Ezeket az adatokat bírálatomban is célszerűnek tartottam rögzíteni, bírálatom könnyebb követhetősége érdekében.

A szintaktikus fémhabok előállításához alkalmazott Blücher-féle nyomásos infiltrációs berendezés és a technológiai folyamat bemutatása meggyőzően tükrözi Jelöltnek az adott eljárás alkalmazásában való jártasságát.

A 3.2 fejezet az alkalmazott vizsgálati eljárásokról szól. A szintaktikus fémhabok mintáinak fény- és elektronmikroszkópos vizsgálatára alkalmas előkészítési eljárását know-how-ként értékelem. Hiányolom ugyanakkor, hogy Jelölt nem szól a minták maratására tett kísérleteiről. Ezek az információk még az ilyen irányú próbálkozások sikertelen volta esetén is hasznosak lehetnek.

A közel statikus, a dinamikus és az ismétlődő terheléssel végzett vizsgálatok technikai részleteinek ismertetése kellő részletességű, bár egyes vizsgálati eljárások bemutatása kiegészítésre szorul.

A síklapok között végzett szabad zömítések a vonatkozó szabványban szereplő mérőszámok segítségével jellemzi. Ezeket a jelöléseket a szintaktikus fémhabok sajátos viselkedése miatt kissé módosítva használja. Az alkalmazott jelöléseket a 3.3. ábra segítségével értelmezi. Már itt utal Jelölt a szintaktikus fémhabok merevsége és az effektív rugalmassági modulus közötti különbségre. E két karakterisztikus jellemző fogalmának helyes értelmezésére az 5.5 alfejezetben még visszatér.

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 radiálisan gátolt alakváltozási állapotban végzett zömítő vizsgálatok technikai feltételeinek ismertetésekor szerencsés lett volna egy elrendezési vázlat közzlése. Úgy ítélem meg, hogy a karakterisztikus mechanikai jellemzők – beleértve az ismétlődő igénybevétellel meghatározható Wöhler-görbét is – meghatározására irányuló kísérletek ismertetésekor Jelölt a technikai részleteken is túlmegy, így a későbbi, az 5-8. fejezetek egyes alfejezeteiben hasonló információkat is olvashatunk. Ez a körülmény az értekezés terjedelmét minden bizonnyal megnövelte és bizonyos mértékben megnehezítette annak áttekintését.

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 másikban nem?

A 3.13-3.16. ábrák EDS technikával készített elemeloszlási térképei az SL típusú gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabok egyes sajátosságaira mutatnak rá. Egyetértve Jelöltnek azzal a megállapításával, hogy az alkalmazott nagyításban a kiválóan keményedő két ötvözetben kialakuló precipitátumok kis méretük miatt nem ismerhetők fel, ugyanakkor az alumínium-ötvözetekben szükségszerűen előforduló Fe és Si tartalmú ún. diszperzoidok nagyobb méretük miatt láthatóvá tehetők kb. 5000x-es nagyításban. Ezek a diszperzoidok az alumínium-ötvözetek mechanikai tulajdonságaiban szerephez juthatnak.

Az értekezés 4. fejezete – amely négy alfejezetre oszlik – a szintaktikus fémhabok előállítási lehetőségeivel és minősítésükkel foglalkozik. Ebben a fejezetben Jelölt fejlesztő és kísérleti munkájának eredményei dominálnak.

A 4.1. alfejezetben irodalmi források alapján elemzi a szintaktikus fémhabok három, leggyakrabban alkalmazott gyártási technológiáját, nevezetesen a porkohászati, a bekeveréses öntési és a nyomásos infiltrációs eljárást. A három technológiai variáció előnyeinek és hátrányainak elemzése után Jelölt arra a következtetésre jut, hogy a nyomásos infiltráció megvalósítása bizonyult technikai és technológiai szempontból egyaránt a legkedvezőbbnek, és a melegkamrás kisnyomású nyomásos öntéssel szerzett tapasztalatok a szintaktikus fémhabok tömeggyártásakor is jól hasznosíthatók. Megállapítja, hogy a nyomásos infiltrációnak három jellemző technológiai változója van: az infiltráció nyomása, ideje és hőmérséklete. Ezek a változók határozzák meg a szintaktikus habból előállítható darab méretét és minőségét.

Az infiltrációs hossz és az infiltrációs idő közötti kapcsolat leírására vonatkozó modellek elemzéséből Jelölt arra a következtetésre jut, hogy minden részletében megfelelő modell még nem született meg, például kérdéses az inkubációs időre vonatkozó megfigyelés is. Mindezekből Jelölt helyesen arra a következtetésre jut, hogy az infiltrált hossz-infiltrációs idő közötti kapcsolat vizsgálatára feltétlenül szükség van egy, a célnak megfelelő kísérleti berendezés kifejlesztésére, különösen a kis infiltrációs időkre tekintettel.

A 4.2. fejezetben az előzőekben megfogalmazott célok elérése érdekében kifejlesztett kísérleti infiltráló berendezést ismerteti. Az új, saját fejlesztésű berendezéssel nagyobb infiltrációs hossz is elérhető, és az infiltráló nyomás felépülése is olyan gyors, hogy az inkubációs idővel kapcsolatos kérdés a kísérleti eredmények alapján egyértelműen eldönthető.

Az új infiltráló berendezés kifejlesztése Jelölt munkájának kiemelkedő teljesítménye, és ugyanakkor jól bizonyítja a csoportmunka irányítására való alkalmasságát. 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.

Kiemelem, hogy az infiltrációs berendezés számítógépi környezetben működik, vagyis mai szóhasználattal 4.0-as gyártóeszközzel van szó. A saját fejlesztésű infiltráló berendezéssel végzett kísérletek eredményeit a 4.3. alfejezetben értékeli Jelölt. Az inkubációs idő léteivel vagy nemléteivel kapcsolatos meg nem válaszolt kérdés miatt a rövid idejű, 10 sec-nál rövidebb infiltrációs kísérletekre fokozott figyelmet fordított. A 4.5. ábrán az infiltrációs hossz az infiltrációs időtől és az alkalmazott nyomástól való függését ábrázolja. Megállapítja, hogy az infiltrált hossz az időtől négyzetgyökösen, a nyomástól pedig lineárisan függ.

Az infiltrált hossz az alkalmazott 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?

Az alsó küszöbnyomás meghatározására irányuló kísérleteknél arra a következtetésre jut, hogy ennek a változónak a számítására szolgáló modellek közül a Bárczy-Kaptay modell adja a legjobb közelítést.

A 4.3.1-től a 4.3.3. pontban ismertetett kísérleti munka során előállított mintákon fénymikroszkópos és mechanikai vizsgálatokat végzett az infiltráció minősítésére. A metallográfiai felvételek azt mutatják, hogy a nyomásnak az időnél nagyobb szerepe van a szintaktikus fémhabok mikro-szerkezetére gyakorolt hatása szempontjából.

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

A nyomószilárdság, a törési alakváltozás és az elnyelt energia változása szoros kapcsolatot mutat a sűrűség változásával, amelyre elsősorban az infiltrációs nyomás nagysága hat, de az infiltrálási idő növelése – ha kisebb mértékben is – kedvező hatású lehet.

A 4.4. alfejezetben a következtetéseket fogalmazza meg, amelyekkel azonosulni tudok. Hangsúlyozom, hogy a 4. fejezet Orbulov Imre értekezésének egyik kiemelkedő része, amely egyértelműen bizonyítja fejlesztői adottságait, bonyolult kísérleti munkára való alkalmasságát és a mérési eredmények korrekt interpretálására való képességét.

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 megválaszolendő, 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 szakirodalmi áttekintésben felhasznált saját publikációk egyértelműen bizonyítják Jelölt eredményes és kiterjedt kutatómunkáját.

A nem kerámia gömbhéjakkal előállított alumínium mátrixú szintaktikus habok vizsgálatakor az átmeneti réteg szerepével kapcsolatban adódnak új megközelítések.

Az alfejezet végén Jelölt a következőképpen fogalmazza meg az 5. fejezetben ismertetett munka célját: „...a tervezési adatok halmazának bővítése”. A Jelölt által megfogalmazott cél szem előtt tartásával készítettem el bírálatomnak a további részét.

Az 5.2 alfejezet a gömbhéjak méretének a karakterisztikus mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával foglalkozik. A karakterisztikus mechanikai jellemzőknek a gömbhéj méretétől és a minta karcsúságától való függését reprezentáló mérések értelmezése meggyőző.

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.

A mátrix anyagának a karakterisztikus mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását kiterjedt kísérleti munkára támaszkodva közelíti meg az 5.3. alfejezetben. A mátrix anyaga Al99,5, AlMgSi1,

AlCu₅ és AlSi₁₂ volt, az oldó hőkezelés utáni illetve kikeményített állapotban. Az erősítő anyag minden esetben az SL300 típusú kerámia gömbháj volt.

A mátrixanyag megválasztásának általános szempontjával egyet tudok érteni, de az AlCu₅ helyett inkább egy modern, pl. AlLi₃ ötvözetet választottam volna. Ez az ötvözet jelenti a repülőgépiparban leggyakrabban alkalmazott anyagot. Az infiltrált minták vizsgálati eredményeinek értékelése általában korrekt, de az bővebb kifejtést érdemelne, hogy milyen mechanizmuson keresztül érvényesül a mátrix anyagának meghatározó szerepe a karakterisztikus mechanikai jellemzőkben, és miért nem jut nagyobb szerephez az átmeneti réteg tulajdonsága ott, ahol a kialakulásának megvan a lehetősége.

A kiválasztott 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.

Az alfejezetben tárgyalt témával kapcsolatban megjegyzem, hogy egy adott anyagcsoport egyes tagjainak egyedi tulajdonságok alapján való összehasonlítása lehetséges, de nem célszerű. Szerencsésebb lett volna ezért valamely – éppen a kompozitok minősítésekor alkalmazott – komplex mérőszám bevezetése és alkalmazása, amellyel az anyagcsoport egyes tagjai teljesítőképességük (performance) szerint sorrendbe rakhatók.

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? [120-123] illetve [124-127] szerzői szerint a mátrix és az erősítő anyag közötti kapcsolat meghatározó módon befolyásolja a fémhabok viselkedését. Ez a megjegyzés is indokolja az 1. fejezettel kapcsolatban megfogalmazott kérdésemet.

Az 5.4.1. pont a különböző mátrixanyagok, SL 300 típusú gömbhájjal 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 modellezés.

A nyomóvizsgálati diagram matematikai leírása végül is mérnöki szempontból kielégítő eredményt hozott, és hozzájárult a zömítés közben lejátszódó folyamatok tisztásához, de ezeknek az analitikus egyenleteknek a használata nem szolgáltat ahhoz képest többlet-információt, mintha a méretezéshez szükséges adatokat a Jelölt által mért adatokkal feltöltött adatbázisból olvasnánk ki.

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 Al_{99,5}-SL300 anyagra nézve!

Részben az előző pontban ismertetett matematikai leírás és elemzés eredményeire alapozva az 5.4.2. pontban Jelölt a szintaktikus fémhabok nyomóvizsgálati görbéinek jellegzetességeivel és ezzel összefüggésben a minták tönkremeneteli változataival foglalkozik. A plató alakjával kapcsolatban három esetet különböztet meg, amelyekhez egy-egy adott tönkremeneteli folyamat rendelhető.

A plató alakja és a tönkremeneteli mód közötti kapcsolatra vonatkozó megfigyeléseket és megállapításokat az értekezés fontos részének tartom. Az is megnyugtató, hogy a nyomóvizsgálati görbe anyagtudományi alapokon nyugvó modellezése Orbulov Imre kutatócsoportjának jövőbeli tervei között szerepel.

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 figyelembe vételével?

Az 5.5.1. pont részben választ is ad erre a kérdésre, amely a szintaktikus fémhabok alakváltozási mechanizmusával foglalkozik. A nyomóvizsgálatokkal párhuzamosan végzett akusztikus emissziós vizsgálatok az alakváltozási mechanizmusra nézve számos érdekes információt szolgáltatottak. A vizsgálati minták Al99,5-GC típusú kompozitok voltak.

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 effektív rugalmassági modulus mérése összetett kérdés, amellyel Jelölt az 5.5.2. pontban foglalkozik. Egyik lehetőségként a modális analízist tárgyalja, amelynek alkalmazásában a BME Műszaki Mechanikai Tanszék volt Jelölt partnere. A rúd elmélet paramétereinek közül az adott esetben a saját körfrekvencia értékek a legfontosabb jellemzők, amely kapcsolatba hozható a tényleges rugalmassági modulusal.

A Timoshenko-féle rúd elmélet 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!

Jelölt az 5.5.3. és 5.5.4. pontokban folytatja az effektív rugalmassági modulus meghatározására irányuló munkája bemutatását. Ez a két pont is több részterületet érint. Az 5.5.3 pontban tárgyalja Jelölt a véges elemes analízisen alapuló eljárásokat, ezek között a klasszikus mechanikai megközelítést (ideálisan rugalmas testre vonatkozóan) és a Timoshenko-féle rúd elmélet algoritmusának megfelelő számításához szükséges saját frekvenciák meghatározását. Ez utóbbi esetben értelemszerűen felhasználja az 5.5.2. pontban tárgyalt ismereteket is. A gondolatmenetét kissé megtöri a véges elemes háló létrehozásának szükségszerű, de talán nem ebben az alponthoz való megjelenése. Megítélésem szerint a homogenizációs eljárás általános, az 5.5. alfejezet elején szereplő ismertetése feleslegessé teszi az 5.5.4 pontban leírtakat.

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 erősítő

anyag 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 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 jelent. Kérdésem, hogyan kell ezt értelmezni, és ebben az esetben hogyan jellemezhető a modell típusa?

Jelölt végül a lehetőségek közül a Mori-Tanaka és a differenciális önkonzisztens (DSC) becslést alkalmazta. Úgy gondolom, hogy a TM és a DSC módszer alkalmazásához szükséges összefüggések közlése a gondolatmenet követését megtöri, szerencsésebb lett volna – akár számpéldákkal – mellékletként közölni.

Az 5.18. ábrán az 5.5.2, 5.5.3 és 5.5.4 pontokban ismertetett eredményeket ábrázolja és hasonlítja össze Jelölt, megállapítva a viszonylag jó egyezést.

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

A „Hibrid szintaktikus fémhabok” címet viselő 5.6. alfejezet a témakör megközelítési módját tekintve az 5.2. alfejezethez hasonlít, vagyis alapvetően kísérleti eredményekre támaszkodva tesz Jelölt megállapításokat. Lényegében kétféle hibrid habot állított elő és vizsgált.

Az egyik típust azonos méretű, de eltérő anyagú GC és GM típusú gömbhéjakkal állítja elő, míg a másikat eltérő méretű kerámia gömbhéjak (SL illetve GC) alkalmazásával erősítette. A mátrix anyaga mindig az AlSi12 eutektikus ötvözet volt. Az eltérő anyagú gömbhéjakkal végzett kísérletek köre nagymértékben kibővült a GC és GM gömbhéjak egymáshoz viszonyított arányának változtatásával.

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 gömbhéjakkal vékonyabb átmeneti réteget detektált Jelölt EDS technikával, mint a GC gömbhéjakkal.

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?

A GC/GM arány változtatásával a mechanikai jellemezők kedvező irányú változtatása érhető el. Itt is felvetődik azonban a komplex mérőszámok alkalmazásának lehetősége illetve igénye.

Az 5.6.1. pont eredményeit Jelölt az (5.31) egyenletben fogalmazza meg, amely lehetővé teszi a tervező mérnök számára az ilyen típusú hibrid fémhabok tulajdonságainak tudatos tervezését és előrejelzését. A leírtak alapján az eredmény tézisként való megfogalmazását megalapozottnak tartom. A gradiens típusú hibrid fémhabokra vonatkozó felvetés érdekes lehetőséget jelent, a nyomóvizsgálati görbe értelmezése számos új kérdést vetne fel.

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?

Az uni- és bimodális eloszlású kerámia gömbhéjakat tartalmazó szintaktikus fémhabok feszültség-alakváltozás diagramjai összehasonlításának elemzéséből Jelölt megállapítja, hogy a bimodális habok viselkedését lényegében a nagyobb méretű GC gömbhéjak határozzák meg, és a tulajdonságokra gyakorolt hatásuk kedvezőtlen.

Az 5.6.3. pontban bemutatott munka már túllép a műszaki anyagtudomány szokásos értelmezési körén, hiszen kétfajta kompozitból álló alkatrész (tartó) előállításával kísérletezik. Ez a munka szervesen kapcsolódik Jelölt PhD munkájában ismertetett fejlesztő munkájához. A „tartó”-nak minősülő alkatrészek nyomásos infiltrációval történő előállítása speciális megoldásokat követelt meg. A metallográfiai vizsgálatok szerint a szálerősítésű kompozit huzalnak a szintaktikus fémhabba való beépülése megfelelő volt.

A mechanikai vizsgálatok önmagukban nem mutattak kedvező képet, de sűrűsége fajlagosítva a tönkremeneteli sorban meg is előzi, a referenciadarabot. Ez a megállapítás is arra utal, hogy a kompozitok minősítésekor a teljesítőképességet, és nem az egyedi jellemzőket kell figyelembe venni.

Az 5.7. alfejezetben – amely a Következtetések címet viseli – Jelölt az egyes alfejezetekben elért eredményeket veszi sorra, hangsúlyozva a szintaktikus fémhabok mikroszerkezete és a karakterisztikus mechanikai tulajdonságok közötti szoros kapcsolatot.

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 6.1. alfejezet a témakör szakirodalmát taglalja, elemzi. Jelölt a publikált eredményeket meglehetősen ellentmondásosnak tartja. Az ellentmondások tisztázását segíti elő az a körülmény, hogy Jelölt szigorúan ellenőrzött feltételek mellett előállított mintákkal kísérletezett.

A 6.2. alfejezetben GC típusú gömbhéjakkal erősített, különböző mátrixanyagú és hőkezeltégi állapotú minták nagy alakváltozási sebességgel (933sec^{-1} és 2629sec^{-1}) meghatározott karakterisztikus mechanikai jellemzőit ismerteti.

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 6.7. és 6.8. ábrában közölt eredményeket értékes kísérleti eredményként értékelem a különböző mátrixú és hőkezeltégi állapotú minták elnyelt energia reális összehasonlítása szempontjából.

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 6.3. táblázatban szereplő adatok Jelölt széleskörű tájékozottságáról tanúskodnak. A táblázat adatainak szöveges értékelését szívesen olvastam volna.

A 6.3. alfejezetben Jelölt a kvázistatikus 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 6.4. alfejezet a 6. fejezetben ismertetett eredményekből levonható következtetéseket lényegre törően fogalmazza meg.

A 7. fejezet a szintaktikus fémhabok radiális irányban gátolt zömítésével foglalkozik az előző fejezetekkel megegyező struktúrában. Ezeket a vizsgálatokat Jelölt a szintaktikus fémhabok egyik lehetséges, speciális alkalmazási lehetőségével indokolja.

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?

A 7.2. alfejezetben a radiális irányban gátolt zömítő vizsgálat során meghatározható mechanikai jellemzők segítségével az erősítő gömbhéjak méretének, a mátrix anyag minőségének és hőkezeltiségi állapotának a hatását ismerteti. Az egyes jellemzők kedvező vagy kedvezőtlen irányú változására vonatkozó eredmények érdekesek, de – hasonlóan például az 5.5.1 alfejezethez tett megjegyzésemhez – itt is célszerűbb lett volna egy komplex mérőszám megfogalmazása, és ennek alapján egy sorrend felállítása. Úgy ítélem meg, hogy a kísérleti munka nehézségei miatt a mérési eredményeket csak korlátozottan szabad felhasználni. Ebben a kísérletsorozatban is szívesen láttam volna a mátrix és az erősítő anyag tömbi mintáinak zömítő vizsgálati eredményeit, a minta-szerszám kölcsönhatás jobb megítélhetősége miatt.

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

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?

A 7.4. alfejezetben megfogalmazott, lényegében kísérleti megfigyelésekre alapozott következtetések összhangban vannak a 7.2-7.3 alfejezetek tartalmával, de az egyes jellemzők értelmezése részletesebb mechanikai elemzést igényelne, lásd például a palást menti súrlódás szerepét.

Az értekezés utolsó, 8. fejezete a szintaktikus fémhabok ismétlődő nyomó igénybevétel során tanúsított viselkedésével foglalkozik. Már előljáróban megjegyzem, hogy ezen a területen Orbulov

Imre munkája úttörő jellegű. A részfeladat szakirodalmának 8.1. alfejezet szerinti összefoglalásában döntően a fémhabok fárasztóvizsgálataival foglalkozó publikációk szerepelnek. A szintaktikus fémhabok ilyen irányú vizsgálatával foglalkozó munkák száma kicsi. Éppen ezért ezek részletesebb ismertetése indokolt lenne, bár egy nem kerámia gömbhéjakkal erősített hab viselkedéséről Jelölt részletesen beszámolt. A szintaktikus fémhabok fárasztó vizsgálata szempontjából is lényeges [141] Ashby és munkatársai összefoglaló munkája, illetve Degischer és Kriszt [143] munkája. A nyílt és zárt cellás habokkal kapcsolatos fárasztóvizsgálatokra vonatkozó javaslatokat Jelölt jól hasznosította, a munkahelyén az adott területen az elmúlt évtizedekben felhalmozott tapasztalatokhoz hasonlóan.

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 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?

A kisebb átmérőjű SL gömbhéjakkal gyártott szintaktikus fémhabok viselkedését a GC gömbhéjakkal erősített habok viselkedésével Jelölt már ebben az alfejezetben kezdi tárgyalni, de a tönkremeneteli módokat részletesen a 8.3. alfejezet taglalja.

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

A 8.4. alfejezet a fárasztóvizsgálati eredmények tömör, szakmailag korrekt összefoglalását tartalmazza.

Jelölt az értekezésének tartalmát a mintegy másfél oldalnyi terjedelmű 9. fejezetben foglalja össze. Érthető, hogy ez a rész új információkat már nem ad, hacsak Jelöltnek a következő években tervezett kutató munkájára utaló megjegyzéseket ilyenek nem tekintjük.

Engedtessek meg nekem, mint bírálónak, hogy a fejezet mondanivalójának értékelése helyett saját véleményem összefoglalásával fejezzem be bírálatomnak ezt a részét. Már korábban kifejtettem, hogy Jelölt témaválasztása helyes és korszerű, és a választott témán belül reális és előremutató célokat fogalmazott meg.

Ennek előrevetítése után már csak azt vizsgálhatom, hogy Jelölt munkájával elérte-e a kitűzött célját vagy céljait. Erre egyértelmű igen a válaszom, hiszen a megfogalmazott célkitűzések mindegyik

elemére nézve találunk válaszokat, és a válaszok között tézisként megfogalmazott eredmények is vannak. A tézisek mindegyikéhez referált folyóiratban megjelent saját publikáció tartozik.

Az értekezés nyilvános vitára való bocsátását javaslom. Mielőtt a tézisekről kifejténém álláspontomat, három, az értekezés témájának egészét érintő kérdést is megfogalmazok.

- Hogyan érvényesül a mátrix és az erősítő anyag közötti átmeneti réteg meghatározó szerepe a szintaktikus fémhabok karakterisztikus mechanikai jellemzőiben?
- 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 teljesítőképességének számszerű megítélésére milyen komplex mérőszámokat szokás vagy lehet alkalmazni?

A tézisekkel kapcsolatos állásfoglalásom a következő.

1. tézis: elfogadom. Ezt tartom Jelölt egyik legerősebb tézisének.
2. tézis: elfogadom, mert a tézisben megfogalmazott állításokat az értekezésben szereplő mérések és számítások eredményei egyértelműen alátámasztják, igazolják. Egyértelműbben kellett volna megfogalmazni azt, hogy minek a folyási határánál kisebb az a feszültség, amely a mátrix anyagban megindítja a képlékeny alakváltozást. Az effektív rugalmassági modulus és a szerkezeti merevség közötti megfeleltethetőségre vonatkozó mondat tagadó jellege miatt bár tartalmilag helyes, de formailag tézisben nem szerencsés.
3. tézis: elfogadom, a (10.1) egyenletben megfogalmazott állítást Jelölt gondosan elvégzett és értékelt kísérletekre alapozva fogalmazta meg.
4. tézis: elfogadom, mert a szintaktikus fémhabok felhasználási területe szempontjából fontos mérési adatokat rögzít, amelyeket speciális technikával, reprodukálható mérési eredményeket biztosító módon határozott meg.
5. tézis: az adott témakörrel, vagyis a radiális irányú alakváltozásban gátolt zömítéssel kapcsolatban álláspontomat a 7. fejezetben megfogalmazott kérdésekre adott válaszok függvényében fogom kialakítani. Ezek a kérdések a mérés technikai részletekre vonatkoznak elsősorban.
6. tézis: elfogadom, ezt a tézist az 1. tézissel megegyező jelentőségűnek tartom. Érdeklődéssel várom a tömbi Al99,5 és az AlSi12 minták és a megegyező mátrixanyagú szintaktikus fémhabok Wöhler-görbéinek összehasonlítását!

Budapest, 2018. január 26.

Verő Balázs
a műszaki tudomány doktora, az MTA doktora