

SZLANCSIK ATTILA
DIPLOMATERV

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLÓGIA TANSZÉK



DIPLOMATERV



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ANYAGTUDOMÁNY ÉS TECHNOLOGIA TANSZÉK

SZLANCSIK ATTILA
DIPLOMATERV

Szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságainak becslése
és mérése

Témavezető:

Dr. Orbulov Imre Norbert

Egyetemi docens

Budapest, 2016

Ide kell befűzni az eredeti feladatkiírási lapot!

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ezen diplomaterv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E diplomatervet a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2016. december 9.

Dr. Orbulov Imre Norbert
témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Szlancsik Attila (L3MH7Y)*, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2016. december 9.

Szlancsik Attila
szigorló hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	3
1. Bevezetés.....	4
2. Szakirodalmi áttekintés	6
2.1. A szintaktikus fémhabok fejlődéstörténeti áttekintése	6
2.2. A szintaktikus fémhabok fogalma, csoportosítása.....	6
2.3. A szintaktikus fémhabok alkalmazási lehetőségei	7
2.4. Szintaktikus fémhabok nyomószilárdsági vizsgálatai	8
2.5. A szintaktikus fémhabok modellezése	11
2.6. A szintaktikus fémhabok folyásgörbéjének becslése.....	20
2.7. A szintaktikus fémhabok szerkezeti merevségének becslése analitikus módszerekkel	21
3. Szintaktikus fémhabok végelelemes modellezése.....	29
3.1. A gömbhéjak kiosztása.....	29
3.2. A 3D-s modell és a végelelemes háló létrehozása	31
3.3. A végelelemes modell létrehozása.....	32
4. A folyásgörbe becslése	38
4.1. A vas gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok Watts-Ford vizsgálata	38
4.2. A vas gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok folyásgörbéjének becslése...	40
5. A szerkezeti merevség becslése	49
5.1. A szerkezeti merevség mérése zömítő vizsgálattal	49
5.2. A szerkezeti merevség meghatározása modális analízissel	51
5.3. Modális analízis végelelemes szimulációja	53
5.4. A szerkezeti merevség meghatározása végelelemes modellezéssel	54
5.5. Szerkezeti merevség meghatározása analitikus módszerekkel	55
6. A szerkezeti merevség mérésének, végelelemes szimulációjának és az analitikus számításoknak az eredményei.....	56
7. Összefoglalás.....	62
8. Summary	63
9. További kutatási tervek	64
10. Felhasznált források	65
11. Melléklet.....	69
11.1. A gömbhéj kiosztó program kódja C++ -ban	69
11.2. A gömbhéj kiosztó program Matlab-ban	73

KÖSZÖNETNYÍLVÁNTÁS

Köszönöm konzulensemnek, Dr. Orbulov Imrének, hogy bármikor rendelkezésemre állt, amikor csak kérdésem volt.

Köszönöm Katona Bálintnak, hogy a mérésekben segített.

Köszönöm Dr. Májlínger Kornélnak, Bálint Attilának és Kovács Zsoltnak a TDK-k során az együttműködést, és segítséget.

Köszönöm Kispál Balázsnak és Wéber Richárdnak, hogy a programozási problémákban bármikor kereshettem őket.

Köszönöm továbbá Dr. Dombóvári Zoltánnak a sok segítséget.

Köszönöm a családomnak, hogy végig támogattak.

Budapest, 2016. december 9.

Szlancsik Attila

1. BEVEZETÉS

Napjainkban az energiahatékonyság az egyik legfontosabb szempont a tervezési folyamatokban. Ez nem csak a konstrukciókat befolyásolja, hanem magukat az anyagokat is, így két fő vonal mentén indult el az anyagok felhasználásának hatékonyabbá tétele. Az első, a tömegcsökkentés, amivel az anyagok fajlagos tulajdonságai javíthatóak, a második a terhelés fő irányában, vagy irányjaiban az anyag teherviselő képességének növelése. Az első esetre jó példák a habanyagok, míg a másodikra a különböző részecske vagy szálerősítésű kompozitok nyújthatnak megoldást.

A szintaktikus fémhabok a fenti két megközelítés ötvözeteként állnak elő, ugyanis ebben az esetben a habban meglévő üregeket előre legyártott gömbhéjakkal, többé-kevésbé szabályozott módon hozzuk létre. A kis sűrűségüknek köszönhetően a fajlagos tulajdonságaik kiemelkedőek, ugyanakkor a hagyományos fémhaboknál az esetek többségében sokkalta nagyobb szilárdságúak, és az energiaelnyelő képességük is nagyobb. Ez azért van, mert az üregek falát belülről még a gömbhéj anyaga is támogatja, így alakítva ki a végleges szilárdsági tulajdonságokat.

A szintaktikus fémhabok előállítására két módszer terjedt el: a keveréses eljárás, illetve a nyomásos infiltrálás. Az ebben a dolgozatban bemutatott anyagokat kivétel nélkül gáznyomásos infiltrálással gyártottam [1, 2, 3].

A szintaktikus fémhabok elsősorban nyomásra vannak igénybe véve, ennek megfelelően a zömítővizsgálati jellemzőiket széles körben tanulmányozzák. A legfontosabb jellemzőik a nyomószilárdság, a törési alakváltozás, a szerkezeti merevség és az adott alakváltozásig elnyelt mechanikai munka [1]. - A szerkezeti merevség és a rugalmassági modulusz között az a különbség, hogy a rugalmassági modulusz anyagjellemző, tehát az értéke nem függ a próbatest méretétől és alakjától, ellenben a szerkezeti merevséget erősen befolyásolhatja a geometria. Az effektív rugalmassági modulusz egy olyan speciális szerkezeti merevség, amely a fémhabok esetén csak a térkitöltéstől függ. A szerkezet nagysága nem befolyásolja, tehát különböző térkitöltésű fémhabok esetén más lesz az effektív rugalmassági modulusz érték, ellenben ha azonos térkitöltésű anyagból készítünk két különböző méretű próbatestet ez az érték állandó marad. - A fémhabok legfontosabb jellemzői mind kinyerhetők a fémhabok szabványosított zömítő vizsgálatából [4]. Ez azért különösen előnyös, mert ez egyezik a leggyakoribb terhelési móddal is.

Mivel sokféle erősítő- illetve mátrixanyag kombináció képzelhető el, ezért egyre nagyobb hangsúlyt kap a felsorolt tulajdonságok számításokkal történő becslése, lehetőleg úgy, hogy ne kelljen legyártani az adott habot, így energiát és erőforrást spórolva meg. A becslések történhetnek matematikai úton, illetve végeselemes szimulációk segítségével. A modern számítógépeknek köszönhetően már a több millió elemet tartalmazó végeselemes modelleket is könnyen ki lehet értékelni, ami egy teljesen új perspektívát nyitott meg az új típusú anyagok illetve szerkezetek mechanikai tulajdonságainak vizsgálatában. Azonban ahhoz, hogy egy jól működő modellt készíthessünk,

olyan anyagmodellre van szükségünk, ami képes kezelni a fémhabok tulajdonságait anélkül, hogy a benne található gömböket egyesével modellezni kéne. Ennek a modellnek a meghatározásához tartozó első lépés egy olyan folyásgörbe megalkotása, ami csak a mátrix-, illetve az erősítőanyag tulajdonságait tartalmazza.

A diplomatervem egyes részletei tudományos folyóiratokban is közlésre kerültek, ezeket a hivatkozásokat dőlt szedéssel különítem el, mind a hivatkozás helyén, mind pedig a hivatkozásjegyzékben.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A szintaktikus fémhabok fejlődéstörténeti áttekintése

A szintaktikus fémhabok kialakulása a polimer mátrixú szintaktikus habokhoz köthető, amit tudomásom szerint először Kallas és Chatten [5] publikáltak. Az első szintaktikus fémhabokat az 1990-es évek elején állították elő, akkoriban főként katonai célokra alkalmazták. Mivel alig fél évszázada fejlesztették ki ezt az anyagcsaládot ezért érthető, hogy még nincs jelentős mértékben elterjedve [6]. Az elterjedését korlátozta, hogy kezdetben, úgy, mint sok más anyag kapcsán, ezt is a hadiiparban alkalmazták és kutatták, így a kezdeti eredmények nagy része nem, vagy csak részben elérhető. A nyíltcellás fémhabokhoz hasonlóan ezek is előállíthatóak 3D fémnyomtatók segítségével [7]. Ez a technológia is csak napjainkban kezd kiforrni ezért nagy potenciál rejlik ezekben az anyagokban és eljárásokban. Azért is különösen figyelemreméltók a 3D nyomtatással előállított fémhabok, mert szabályos formák alakíthatóak ki bennük, ami nem mondható el a hagyományos technológiákkal előállított fémhabokról. A következő alfejezetekben a szakirodalmi kutatás eredményeit foglalom össze. Mivel a szakirodalomban nem találhatóak az én mintáimmal megegyező összetételű fémhabok, ezért a saját eredményeim [1, 2, 3] kívül más kutatók által gyártott, többé-kevésbé hasonló fémhabokon végzett kísérleti eredményeket is ismertetem.

2.2. A szintaktikus fémhabok fogalma, csoportosítása

A kompozitok olyan szerkezeti anyagok, amelyeket két vagy több anyag egyesítésével állítanak elő annak érdekében, hogy előtérbe helyezték az alkotók alkalmazás szempontjából fontos és előnyös tulajdonságait, akár a hátrányos jellemzőik háttérbe szorítása mellett. A két leggyakrabban előforduló főcsoportjuk a szál- illetve a részecske erősítésű kompozit. Az általunk vizsgált fémhabok az utóbbi kategóriába sorolhatók. A szintaktikus fémhabok olyan zárt cellás porózus szerkezeti anyagok, amelyekben a porozitást a fémes mátrixanyagba ágyazott, egymáshoz képest többé-kevésbé szabályos és egyenletes elrendeződésű gömbhéjak segítségével bevitt üregek adják [1]. A kompozitok esetében mindig nagy hangsúlyt fektetnek a mátrix és az erősítőanyag között kialakuló átmeneti rétegre. Ennek a rétegnek a szerepe kiemelkedő, hiszen ez a vékony réteg felelős a terhelés átadásáért a mátrixanyag felől a terhelést ténylegesen viselő erősítőanyag felé.

Megkülönböztethetünk mesterséges (az ember által létrehozott) és természetes kompozitokat [8]. Mesterséges kompozit például a beton, a szénzál-erősítésű polimer és természetesen a szintaktikus fémhabok. A legősibb természetes kompozit a fa, illetve a csont [9]. Manapság egyre jobban előtérbe kerülnek a természetet modellező anyagtipusok, az úgynevezett bioinspirált anyagok. Azért kellett ezekre idáig várni, mivel az előállításuk csak a modern gyártástechnológiával lehetséges. Fejlődésük

azonban már külön kutatási ágga vált, a biomimetika, a természet utánzásának technológiája. Egy, a biomimetikán alapuló felhasználási terület lehet a fémhabok csontimplantátumok anyagaként történő alkalmazása, hiszen a nagy fajlagos felületüknek köszönhetően a csontszövet könnyebben megtapad rajta.

A zárt cellás, szintaktikus fémhabok sűrűsége a nyílt cellás fémhabok sűrűségének akár kétszerese, háromszorosa is lehet ugyanolyan porozitás mellett, viszont a szintaktikus fémhabok szerkezeti merevsége és szilárdsága nagyobb. Szerkezeti elemeknél, ahol a megfelelő szerkezeti merevség az egyik legfontosabb kritérium, a szintaktikus fémhabok használata lehetőséget nyújt a nagyobb sűrűségű anyagok kiváltására [10].

A szintaktikus fémhabok csoportosítása történhet a mátrix anyaga, a gömbhéjak anyaga, mérete, térkitöltése, illetve a szintaktikus hab sűrűsége, előállítása és az alkalmazási területe alapján. Külön csoportosítási szempont lehet az is, hogy hány alkotónak tekintik a szintaktikus habokat. Egyes szakirodalmi források szerint a szintaktikus habok kétalkotósak: mátrixból és gömbhéjakból állnak. Mások szerint háromalkotósak, amelyekben a harmadik fázis az elégtelen infiltráció miatt a mátrixban a gömbhéjak között jelenlévő nem kívánt üregek (nem kívánt porozitás) [1, 6].

2.3. A szintaktikus fémhabok alkalmazási lehetőségei

Az egyre növekvő igények a könnyebb, de erősebb anyagok felé szorgalmazzák a szintaktikus fémhabok elterjedését. A nyíltcellás fémhabokkal ellentétben ezeknek az anyagoknak a szabályozott porozítások miatt jóval homogénebbek és izotrópok a tulajdonságaik. Ez a tulajdonság illetve, hogy láng- és tűzállóak, sok helyre elsődleges prioritásává teszik. További előnyös tulajdonságaik, hogy jó a rezgés- és zajcsillapításuk, jó a kémiai stabilitásuk illetve nagy a szerkezeti merevségük. Ezen kiemelkedő tulajdonságok mellett azonban egy hátrányt is meg kell említeni, mégpedig azt, hogy ameddig nem terjed el nagyobb mértékben, addig drága lesz a hagyományos alapanyagokhoz viszonyítva.

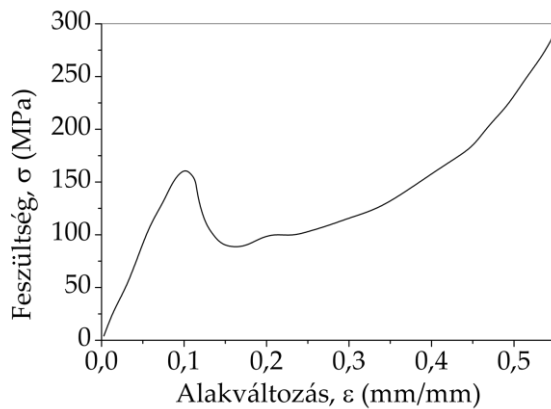
Fő beépítési lehetőségek tehát: szerkezeti anyagként, erősítőanyagként például szendvics panelekbe, vagy rezgés- és zajszigetelő alkatrészként. A titán mátrixú fémhabok felhasználási területe teljesen eltérő is lehet, hiszen a titán biokompatibilis és kitűnő a korrózióállósága, ezért ebből az anyagból elsősorban implantátumokat gyártanak [11].

A szintaktikus fémhabok nem utolsó sorban innovatív lehetőségeket nyújtanak a repülőgépek, űrhajók, illetve a tengeri járművek tömegének csökkentése, azáltal hogy egy könnyebb és stabilabb vázszerkezetet lehet előállítani. Ezzel növelhető a jármű befogadóképessége, raktere [1, 6, 10].

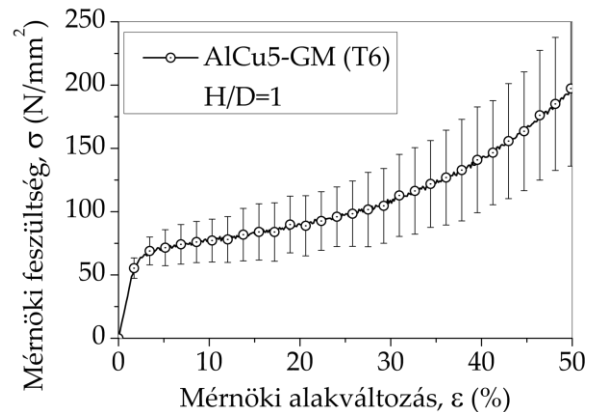
2.4. Szintaktikus fémhabok nyomószilárdsági vizsgálatai

A szintaktikus fémhabok elsősorban energiaelnyelő alkalmazásokban fordulnak elő. Mivel a fő igénybevételük a nyomás, ezért a legjellemzőbb vizsgálati módszer a zömítő vizsgálat. Két fajtáját különböztetjük meg az ilyen anyagvizsgálatoknak: az első a kvázi-statisztikus, a második a dinamikus zömítés [6]. Ezen dolgozatban csak a kvázi-statisztikus zömítővizsgálatokkal fogok foglalkozni.

A szabványosított vizsgálatból [4] több jellemző tulajdonság határozható meg. Az elnyelt energiát a mérnöki alakváltozás – mérnöki feszültség diagramról olvashatjuk le: ez az energia megegyezik a görbe alatti területtel. Egy tipikus kerámia gömbhéjjal erősített szintaktikus fémhab zömítő görbét mutatja be a 2.1. ábra, míg a 2.2. ábra egy tipikus fém gömbhéjjal erősített szintaktikus fémhab zömítő görbét reprezentálja.

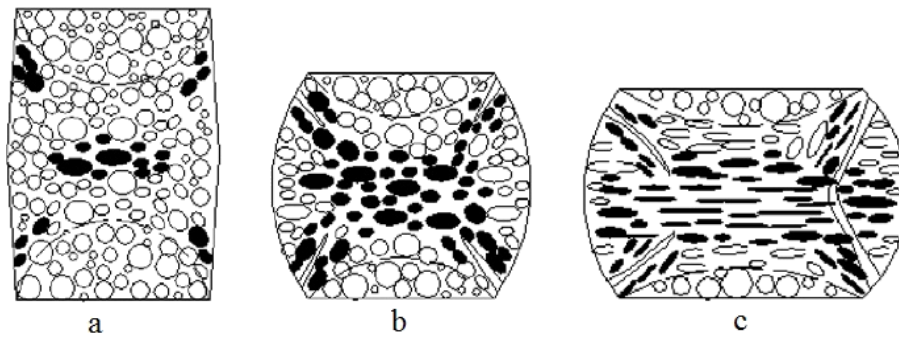


2.1. ábra Al365/SiC fémhab (4 db) kvázi-statisztikus zömítő görbéje mérnöki alakváltozás – mérnöki feszültség rendszerben Luong és társai [10] nyomán



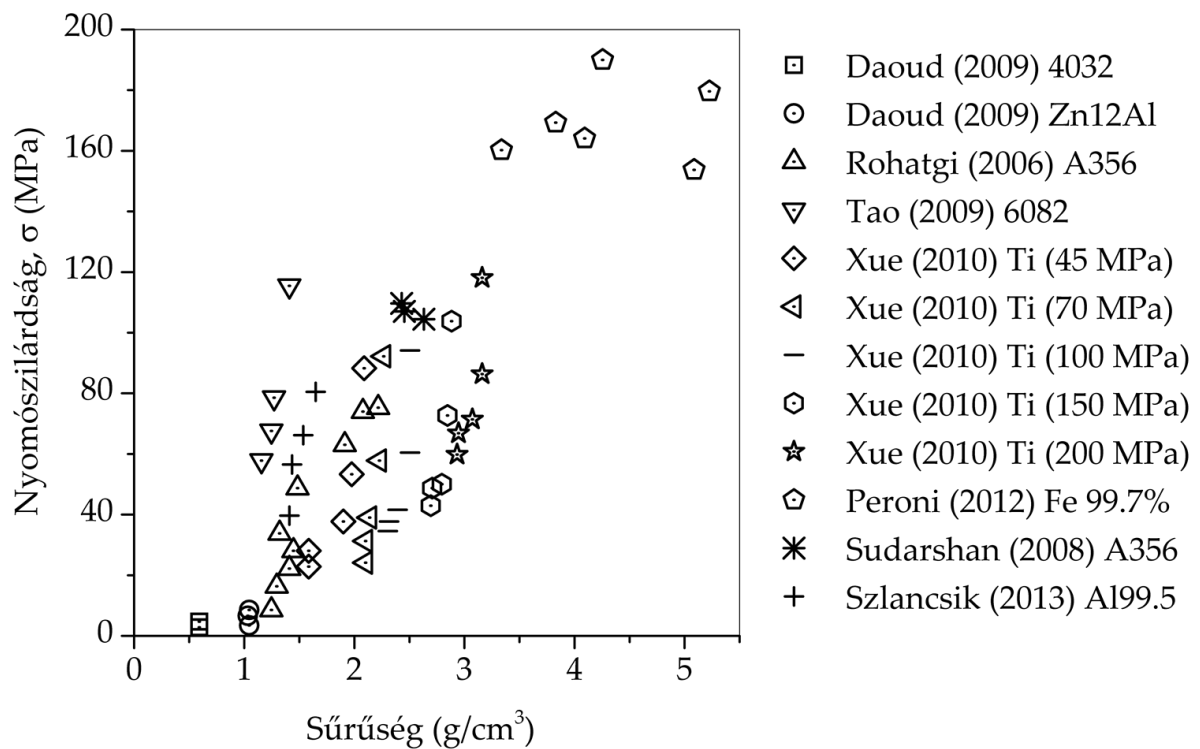
2.2. ábra AlCu5 – GM (T6) zömítő görbéinek (6 db) átlaggörbéje [1]

A görbékkel látható, hogy azért olyan kedvezőek ezek az anyagok, mivel viszonylag nagy feszültségszinten, nagy alakváltozás mellett nyelik el az energiát. A fém- és kerámia gömbhéj erősítés között nem csak a zömítő görbe lefutásában, hanem a törésmeneteli módban is van különbség. Míg a kerámia gömbhéjjal erősített fémhabok egy sík mentén széttörtek, addig a fém gömbhéjjal erősítettek a teljes alakváltozás során képlékenyen alakváltoztak. A kerámia gömbhéjjal erősített fémhabok tipikus törésmeneteli módját mutatja be a 2.3. ábra.



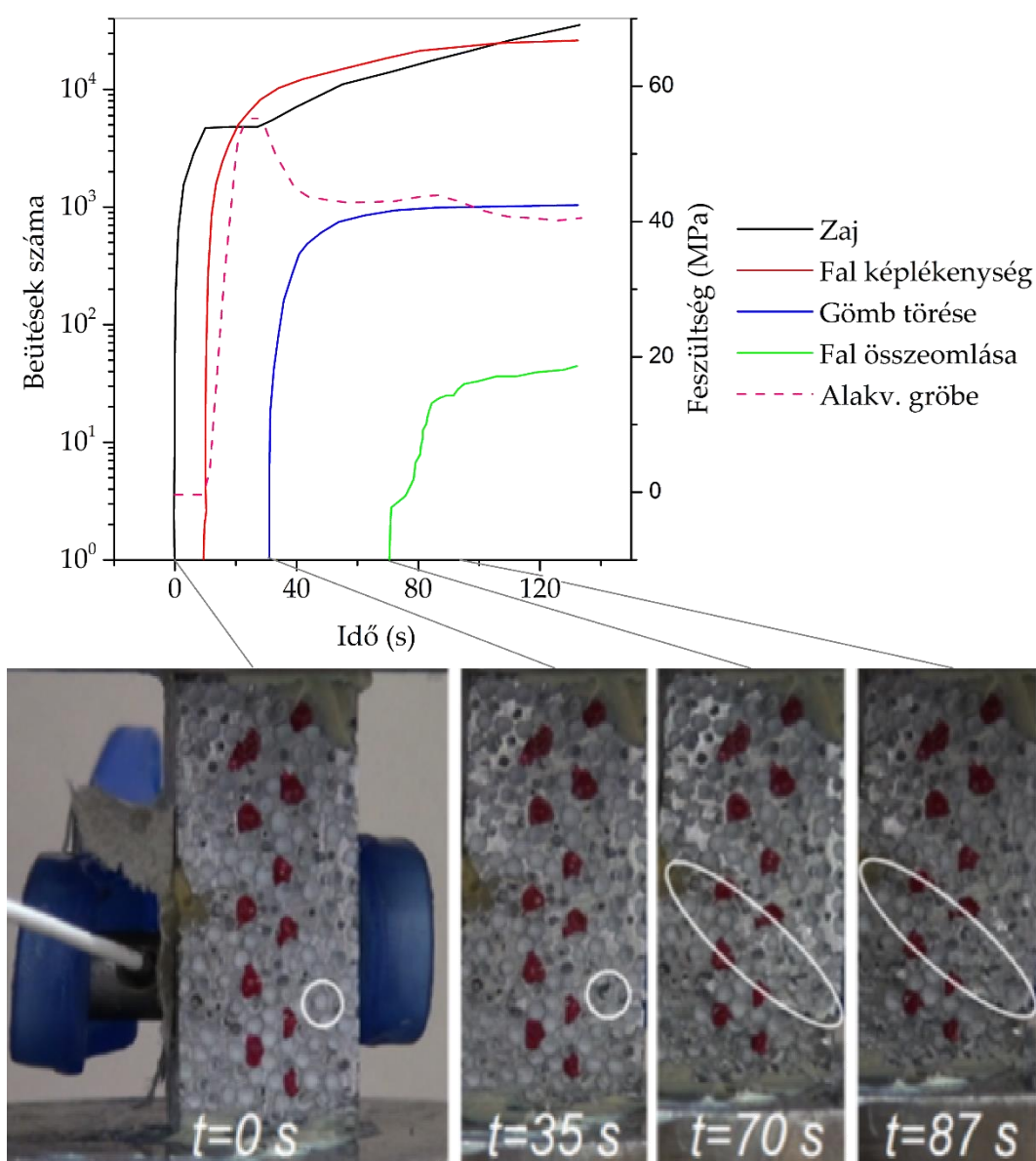
2.3. ábra Wu és társai [11] alapján megállapított jellegzetes tönkremeneteli mód

A zömítő görbéről egy másik fontos érték is meghatározható, mégpedig a nyomószilárdság, ami analóg módon megfelel a fémhabok folyáshatárának. Loung és társai [10] készítettek egy összefoglaló diagramot a könnyűfém mátrixú szintaktikus fémhabok nyomószilárdságáról és sűrűségéről. Azóta sok új fémhab kombináció jelent meg, de a 2.4. ábra jól mutatja a könnyűfém mátrixú szintaktikus fémhabok nyomószilárdságát a sűrűség függvényében.



2.4. ábra Alumínium, magnézium, titán és vas mátrixú szintaktikus fémhabok nyomószilárdsági tulajdonságainak az összehasonlítása Loung és társai nyomán [10]

Kádár Csilla és társai [12] egy speciális módszerrel, akusztikus emissziós vizsgálattal egészítették ki a zömítő vizsgálatukat, annak érdekében, hogy meghatározhassák, hogy mi történik az anyag belsejében a tönkremenetel alatt. A kísérleteik során egy általam is vizsgált összetételű szintaktikus fémhabot vizsgáltak meg. Ebben a fémhabban Globocer típusú kerámia gömbhéjak találhatók, amelyek tipikus mérettartománya 1,3 - 1,8 mm közé esik. Ők voltak az elsők, akik bebizonyították, hogy a zömítés kezdeti szakaszában nem tisztán rugalmas alakváltozás játszódik le, hanem a gömbök között kialakuló vékony falak már a legelejétől képlékeny alakváltozást szenvednek. A 2.5. ábra bemutatja, hogy a beütésszám (az akusztikus emissziós berendezés által detektált események darabszáma) hogyan változik a zömítés során (a zömítőgörbe mentén).



2.5. ábra Kádár Csilla és társai [12] mérési elrendezése, valamint a beütésszám az idő függvényében. A diagramon referenciaként a feszültségváltozás is követhető (szaggatott rózsaszín vonal).

2.5. A szintaktikus fémhabok modellezése

A szintaktikus fémhabok végelelemes modellezésével, és szimulációjával csak az utóbbi 10 évben kezdtek el intenzíven foglalkozni. Kezdetben csak polimer mátrixú habokat modelleztek, majd néhány cikkben kifejezetten a szintaktikus fémhabok is megjelentek. Mivel alig pár cikk foglalkozik ezzel a témakörrel, ezeket részletesen ismertetem.

Marur [13] az effektív rugalmassági modulusz változását vizsgálta a térkitöltés függvényében. Ezt követően a mért és szimulált értékeket hasonlította össze, és azt tapasztalta, hogy a végelelemes modellezéssel számított értékek nagyobbak voltak, mint ahogy azt az elmélet és a mérés alapján várni lehetett volna. 2D-s illetve 3D-s modelleket is kipróbált és azt tapasztalta, hogy a 3D-s modellek jobban közelítették a valóságot, ahogy azt várni is lehetett. A szimulációhoz Marur az Ansys szoftvert használta.

Mondal és társai [14] egy SiC gömbhéjakkal erősített 2024-T6 alumínium mátrixú szintaktikus fémhabot vizsgáltak és modelleztek. Marurhoz hasonlóan a gömbhéjak térkitöltése volt a fő vizsgálati paraméter. A szerzők 5-40% között vizsgálták meg a fémhab szilárdsági tulajdonságait. Az előző modellhez képesti nagy különbség, hogy Mondal és társai külön modellezték a kialakuló átmeneti réteget a gömbhéj és a mátrix között. Összehasonlították, hogy hogyan változnak az értékek, ha a mátrix rugalmassági értékeitől haladnak a gömbhéj rugalmassági értékei felé, és azt tapasztalták, hogy akkor egyeztek a legjobban a mérési és a szimulációs eredmények, hogyha az átmeneti réteg tulajdonságai megegyeztek a mátrixéval.

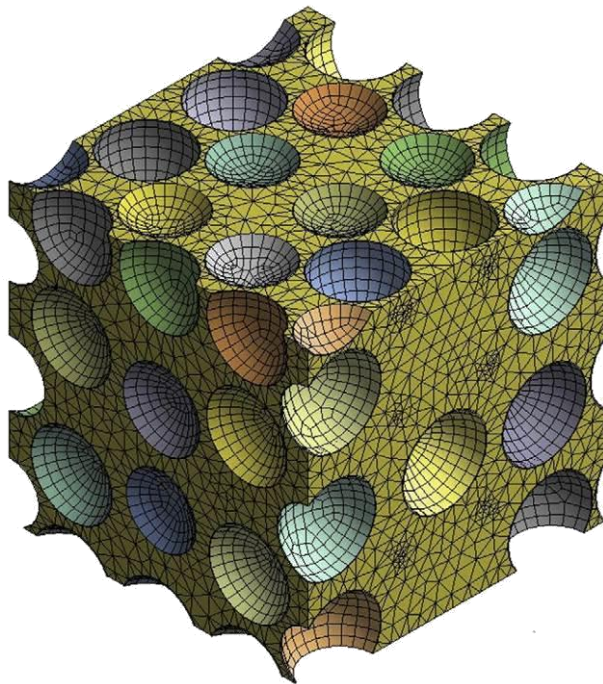
Li és társai [15] csak gömbhéjak tönkremenetelével foglalkoztak, tehát nem habokkal dolgoztak, hanem az egyes gömbhéjak tönkremeneteli módjait vizsgálták. Nikkel gömbhéjakat modelleztek 3D-s szimulációval. Ez a feladat azért különösen nehéz, mert a gömbhéjak tönkremenetelének amennyiben fémes anyagról van szó, nem töréssel, hanem stabilitásvesztéssel jár. Ez a szimuláció szempontjából nagy kihívásokat jelent. Egy 10-20 μm falvastagságú és 2,5 mm átmérőjű gömbhéjat, két merev lemez között zömítettek. Négy csomópontú elemeket használtak, és a szimulációt az Abaqus program segítségével hajtották végre. A falvastagság változtatásának hatását vizsgálták, és azt tapasztalták, hogy a tönkremeneteli módok nagyban függenek az átmérő/falvastagság viszonytól.

Yu és társai [16] szakítóvizsgálatokat végeztek a szintaktikus fémhabokon és ezt szimulálták is. Ez a kutatás ugyan nem zömítéssel foglalkozik, de itt használtak először véletlenszerűen kiosztott gömbhéjakat a modellben, ami sokkal jobban közelíti a valóságot. A 3D-s szimulációt az Abaqus programban végezték el. Az ő céljuk az volt, hogy a kimért eredményeikkel validálhassák a szimulációikat, a mért és a számított eredmények jó közelítéssel egyezőséget mutattak.

Egy másik cikkükben Yu és társai [17] zömítést modelleztek, de ebben az esetben már külön figyelmet fordítottak az átmeneti rétegre is. Ebben a modellben azonban némileg visszaléptek, mert szabályosan voltak kiosztva a gömbhéjak. Azt tapasztalták,

hogy az eredményeik sokkal jobban közelítik a valóságot, ha az átmeneti rétegnek más tulajdonságot állítanak be, mint a mátrixnak, vagy a gömbhéjaknak. A modellezéshez 8 csomópontú hexaéder elemeket használtak. Ez az elemtípus jóval pontosabb eredményekkel szolgálhat, mint az eddigi cikkekben látható 4 csomópontú tetraéderes elemek.

Bardella és társai [28] az Ansys programot használva alkották meg a modelljeiket, amikben különböző térkitöltésű fémhabokat hoztak létre. Hat különböző térkitöltést alkalmaztak, 10-60% között 10%-os lépésközzel (2.6. ábra). A gömbhéjak szabályos rendben voltak elhelyezve, és csak a gömbök átmérőjét változtatták a kívánt térkitöltés eléréséhez. A modellezéshez 10 csomópontú tetraéder elemeket alkalmaztak. Ők is zömítő vizsgálatot modelleztek és a csúsztató rugalmassági moduluszt határozták meg belőle. A szimulációból kapott értékeket az analitikus összefüggésekkel meghatározható effektív rugalmassági modulusz értékekkel, valamint mérési eredményekkel vetették össze. Azt tapasztalták, hogy a szimulált eredmények jobb közelítést adtak, mint a rugalmasságtani alapokon nyugvó analitikus számítások.

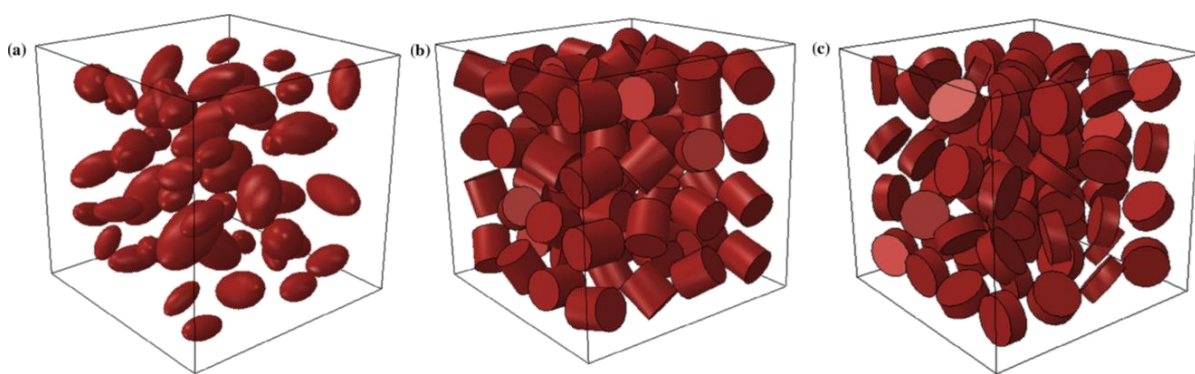


2.6. ábra Bardella és társai [27] modellje 60% gömbhéj térkitöltéssel

Nian és társai [18] munkáját azért emelem ki, mivel ők már változtatták a gömbhéjak átmérőjét is a 3D-s modellükben, tehát egy modellen belül más és más átmérőjű gömbök voltak, ami által jól közelítik a valóságot. Sajnos a mátrixanyaguk vinil - észter volt, aminek a tulajdonságai messze állnak az általam vizsgált fémhabokétól, de a gömbhéjaik üvegből voltak, aminek a tulajdonságai hasonlóan azokhoz a kerámia gömbhéjakéhoz, amik az én fémhabjaimban voltak. A kutatásuk fő célja az volt, hogy

meghatározzák az erősítőanyag falvastagságának szerepét a mechanikai tulajdonságokra, valamint hogy ezeket a tulajdonságokat hogyan módosítja az erősítőanyag formája.

Azt tapasztalták a gömb alakú héjak esetén hogy ha a minta tömegének 4%-a üveg akkor már erősítést értek el. A mechanikai tulajdonságok közül az effektív rugalmassági moduluszt vizsgálták alaposan, ami számomra is különösen érdekes. Az értékek meghatározásánál a sűrűsége vonatkoztatva határozták meg az effektív rugalmassági moduluszt. Ezt követően megvizsgálták, hogy a különböző formájú erősítőanyagok hogyan módosítják a modulusz értékeket. Az 2.7. ábra mutatja be a különböző formájú erősítőanyagaikat egy 3D-s modellben.

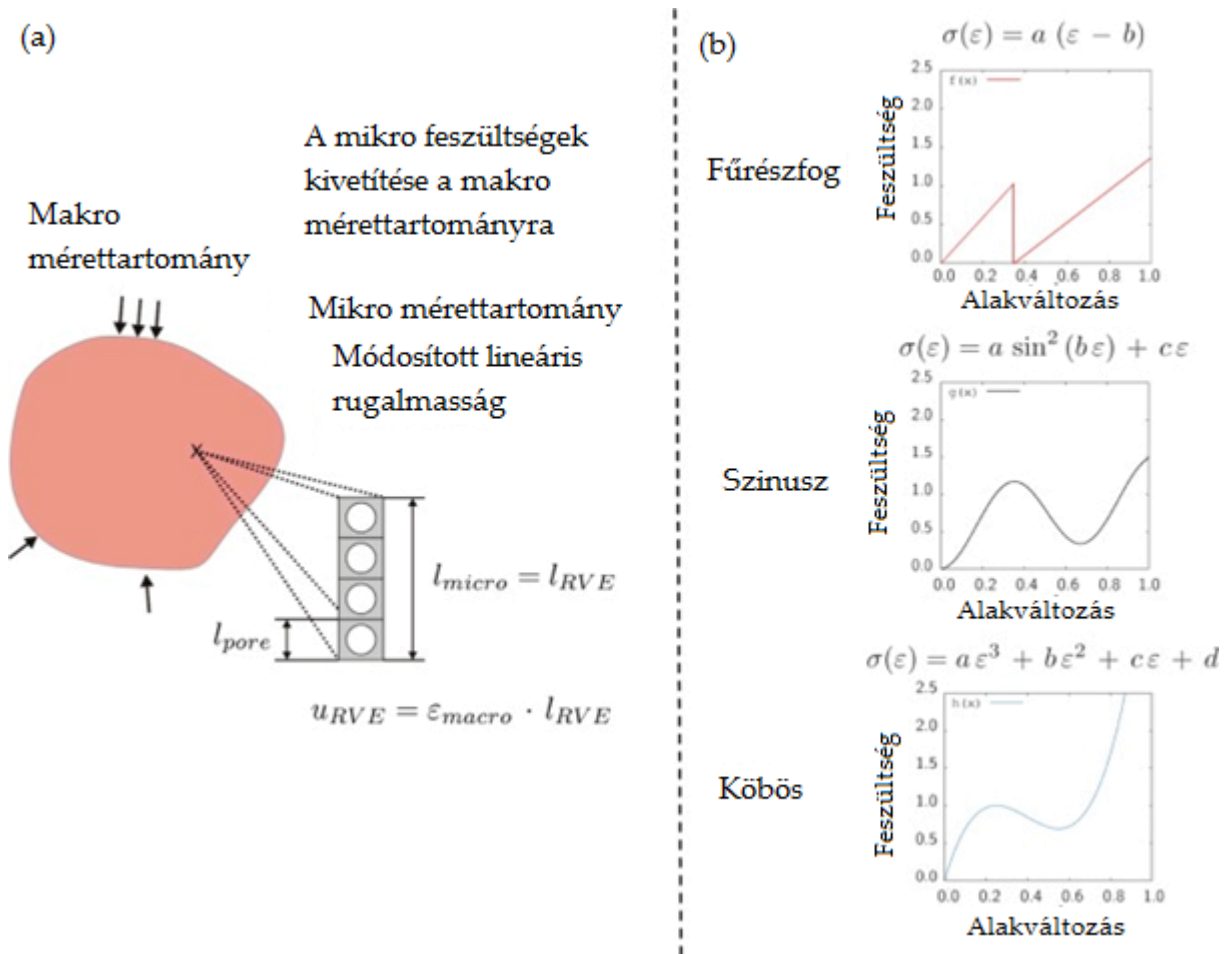


2.7. ábra Nian és társai [18] által vizsgált különböző alakú erősítőanyagokról készült 3D-s modell. Az (a) ábrán ellipszoid alakúak, a (b) ábrán hasáb alakúak, míg a (c) ábrán korong formájú üreges testek láthatók.

Különösen érdekes, hogy véletlenszerű a formájuk és elhelyezkedésük is a modellen belül. Sajnos a hálóról nem osztottak meg információkat, és így nem tudhatom milyen nagyságú elemekkel sikerült ezeket behálózni. Az eredményeikből látszik, hogy az effektív rugalmassági moduluszra nincs különösebb hatása az alaknak, ellenben a Poisson tényezőt csökkenti, ahogy laposodik az erősítőanyag. Ezek alapján is jó döntés, a gömb alakú erősítőanyagokat vizsgálni.

Jung és Diebels [19] egy teljesen új szempontból közelítette meg a fémhabok viselkedését. Azt állítják, hogy három mérettartományban lehet a fémhabokat vizsgálni, ezek a mikro-, mezo-, és makro méretek. Sajnos nem szintaktikus habokat vizsgáltak, hanem nyílt cellás fémhabokat. Első lépésben a mikro modellt alkották meg, ahol a mérethatás nagyon jelentős. A modell megalkotásánál azt feltételezték, hogy a modell jól elkülönülő pórus rétegekből áll, amiknek a tulajdonságai mindig mások egy kicsit. A rétegek közötti kapcsolódásnál, a rétegeket tömeg nélküli rugókkal modellezték. A modell három méret paramétert tartalmazott, L a teljes hab szélessége, L_i a szélesség/magasság hányadosa egy pórus rétegre vonatkozóan és a Q_i pedig a belső hossz, ami azért került bevezetésre, hogy a módosított szélességet meghatározzák miután

egy-egy pórusréteg összenyomódott. Egy réteg térfogata két részből áll, a pórusok térfogatából, valamint a mátrixanyag térfogatából. Miután egy pórusréteg összeomlik, a pórus térfogat visszafordíthatatlanul eltávolításra került. Miután ez a térfogatcsökkenés megtörtént, a többi rugóban a fellépő alakváltozásokat újraszámolják, és a belső hossz is változik. Az összeomlott réteg rugalmassági tulajdonságai, felveszik a mátrixanyag tulajdonságait. Ezek a módosítások azzal járnak, hogy a modellben olyan rugók szerepelnek, melyeknek a merevsége folyamatosan változik, ezeket a változásokat többféle modellel lehet közelíteni.



2.8. ábra A kép bal oldalán (a) a makro, és mikro mérettartománybeli modellek látható, míg a jobb oldalán (b) a képnek a pórusrétegek modellezésére szolgáló mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbék találhatóak (Jung és Diebels nyomán)[19]

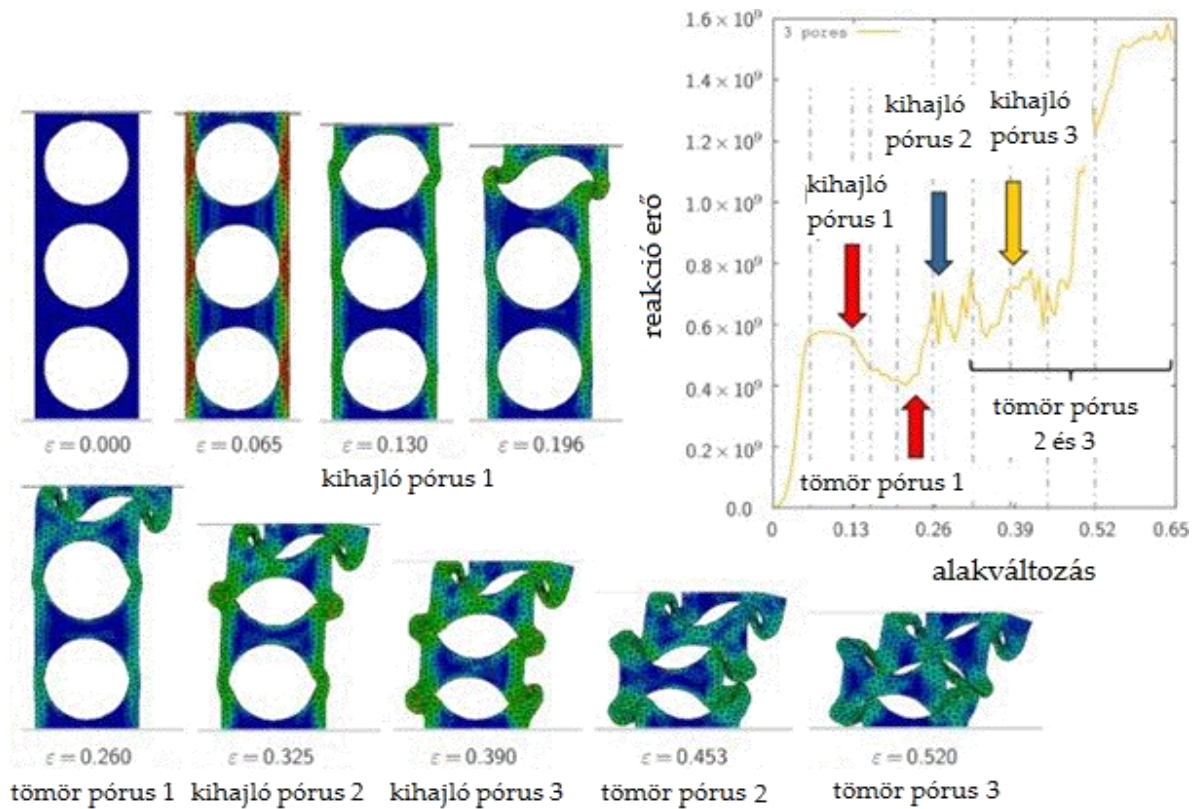
A 2.8. ábra azt mutatja be, hogy a mikro tartományban hogyan modellezték a pórusokat, valamint a kép jobb oldalán láthatók azok a feszültség-alakváltozás görbék, amelyekkel az egyes rugókat lehet modellezni. Az első a fűrészfogas megoldás, ami a legegyszerűbb, de számítás szempontjában nehéz, az éles sarkok, hirtelen ugrások (nem folytonosan deriválható függvény) miatt.

A második egy szinuszos közelítés, ami jóval közelebb áll a valósághoz, de a leírása már bonyolultabb. A szinuszos tagot azért kell négyzetre emelni, hogy csak pozitív tagok legyenek, a monoton növekvő terhelés alatt. Az a paraméterrel lehet beállítani az első csúcs értékét, amit az irodalomban képlékeny összeomlásnak neveznek. Ez az érték megtalálható az általam vizsgált haboknál is, az elnevezése azonban különbözik, mivel csak első csúcsként, törési szilárdságként vagy folyáshatárként szoktak rá utalni. A b paraméter a szinuszgörbe hosszát módosítja, ami a pórusmérettel áll kapcsolatban. A c paraméter pedig a tömörödés során fellépő görbe meredekségét befolyásolja, ezért ez kapcsolatban áll a mátrixanyag mechanikai tulajdonságaival.

A köbös leírás a legösszetettebb, de a legpontosabb is egyben. A paramétereket itt nem olyan egyszerű illeszteni a mikrostruktúra paramétereihöz, mint a szinuszos leírás esetében, mivel minden paraméter módosítása az egész görbe alakjára kihat, nem csak egyes részecskére. A d paraméter a feszültség tengelyen tolja el a görbét, és ahhoz hogy egy feszültségmentes állapotot kapjunk, mikor nincs rajta terhelés, az kell, hogy a d nulla legyen. Az első és második derivált kiszámításával könnyen hangolhatóvá válik a lokális minimum és maximum helye.

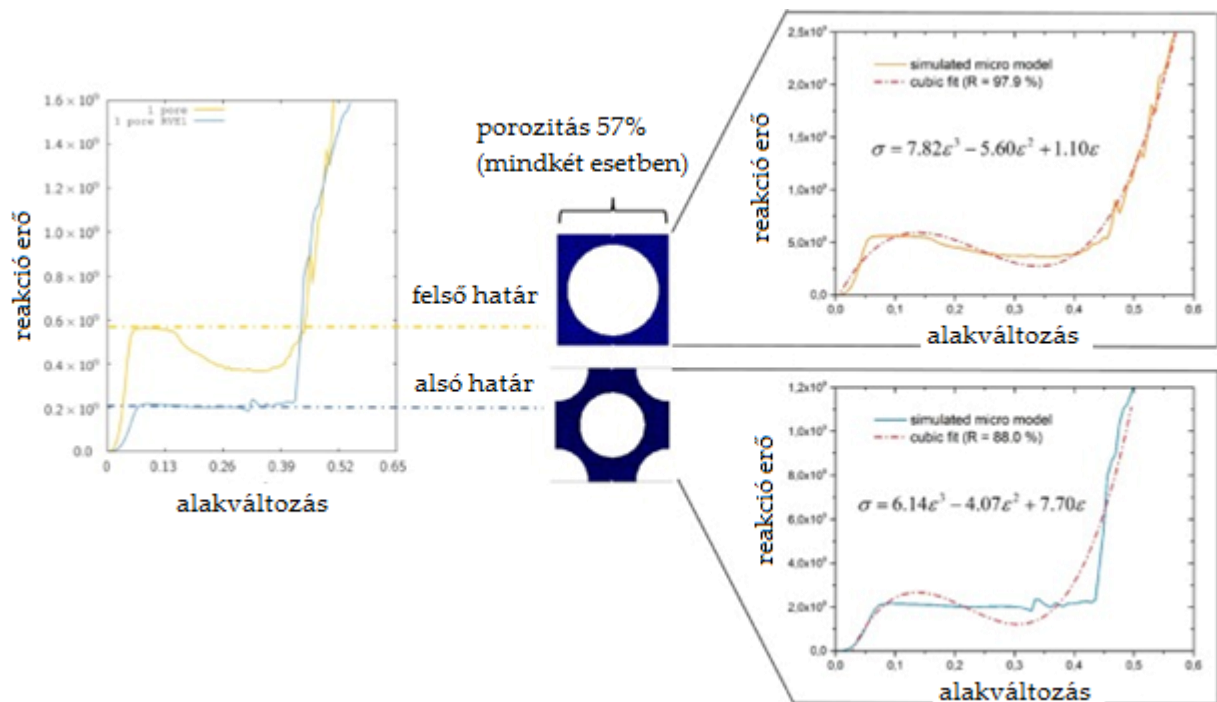
Mindhárom féle leírást kipróbálták, és végül a köbös mellett döntöttek. Ebből öt féle feszültség-alakváltozás lefutást próbáltak ki, és azt tapasztalták, hogy ez a rugómerevséggel beállított modell jól leírja a fémhabok viselkedését.

A következő részben áttértek végeselemes modellezésre, amit Abaqus programmal végeztek. Külön modelleztek egy - egy pórust, és a körülötte található mátrixanyagot. A hálózáshoz lineáris tetraéder elemeket használtak, és a két merev lap között végezték a zömítést. Az alsó lappal érintkező csomópontoknak minden irányban történő elmozdulás ellen lekötötték, amit a „glue” kontakt valósít meg. Ez egy 2D-s szimuláció volt, és sík alakváltozást tételeztek fel. Egy három pórusból álló modell tönkremenetelét mutatja be a 2.9. ábra.



2.9. ábra Egy három pórusból álló 2D-s végeselemes modell zömítésének lépései, valamint az alakítás során fellépő reakcióerő-alakváltozás görbe látható a képen (Jung és Diebels nyomán) [19]

Ahogy látszik az reakció erő – alakváltozás görbén, minden pórus összeroppanása után visszaesik az erő. Az így kapott görbe alakja nagyban hasonlít a szintaktikus fémhabokéra, így számomra is fontos. Egy igen érdekes kísérletet végeztek még ezen kívül. Azt vizsgálták meg, ha nem egységes a pórust körbe vevő mátrixanyag az mennyiben befolyásolja a zömítő görbét (2.10. ábra).



2.10. ábra Kétféle pórustípushoz tartozó reakció erő (N) - alakváltozás (-) görbe, valamint a pórustípusok végeselemes modellje Jung és Diebels nyomán [19]

Ennek azért szenteltem külön figyelmet, mivel a szintaktikus fémhaboknál az 57%-os térkitöltés közel áll a valósághoz, és jól látszik, hogy az alsó modellnek a reakcióerő – alakváltozás görbéje jóval kisebb erő értékeknél fut, amiből az következik, hogy a gömbhéjak hatással vannak egymásra, így nem lehet őket különálló pórusokként vizsgálni. Érdeemes megfigyelni, hogy az alsó esetben a platós szakasz szinte vízszintes volt, míg a felső modell esetében az erő visszaesését figyelhettük meg. Ezeket az eredményeket szem előtt tartva fogom megalkotni a saját modelletem. Fontos azonban kiemelni, hogy ezek 2D-s modellek, valamint csak egy - egy pórusal foglalkoztak, aminek az esetében a mérethatás nem elhanyagolható. De így is kiemelendő milyen jól követik az eredmények a fémhabok erő-alakváltozás görbéinek trendjét.

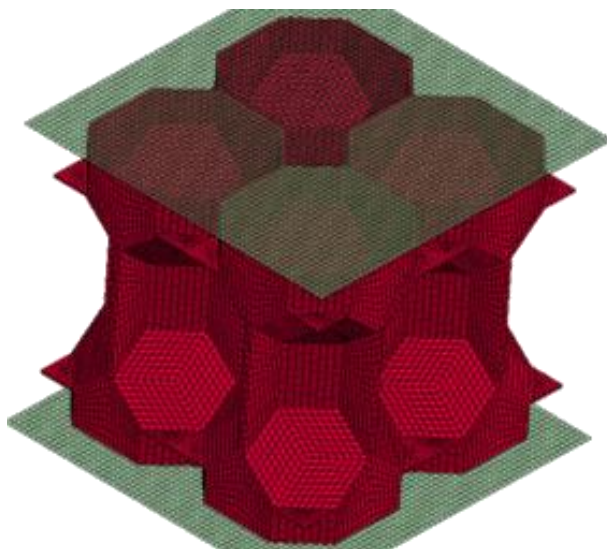
Liu és társai [20] egy olyan reprezentatív térfogati elemet (Representative Volume Element – RVE) készítettek, amin egy alumínium zártcellás hab mechanikai tulajdonságait vizsgálták. A falak vastagságát is külön változtatták az üregek között, ami különösen érdekessé teszi ezt a cikket.

Az RVE felépítésénél egy oktadekaéder elemmel közelítették a gömböket. Azért választották ezt, mert így a falakat a gömbök között állandó vastagságúnak lehet modellezni (a szomszédos „gömbök” falai párhuzamosak). A hálózáshoz 8 csomópontú elemeket használtak, és a végeselemes szimulációt az LS-Dyna szoftverben végezték. A zömítést két merev lap között hajtották végre, ezen kívül egy olyan kontaktot is beállítottak, ami meggátolta, hogy a nagy alakváltozások során saját magába nyomódjon az anyag. Annak érdekében, hogy a fémhab tulajdonságait homogenizálják ciklikus

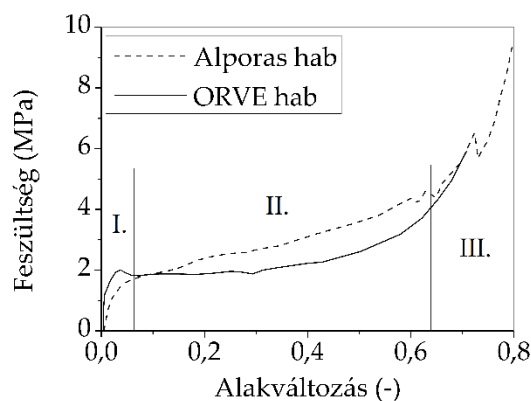
peremfeltételeket alkalmaztak, amivel azt modellezték, hogy végtelen kiterjedésű a fémhab a síkban.

A hálózott modellt mutatja be a 2.11. ábra, míg a

2.12. ábra a validálás során kapott eredményt mutatja be.



2.11. ábra Liu és társai által készített végelelemes modell a fémhabról [20]

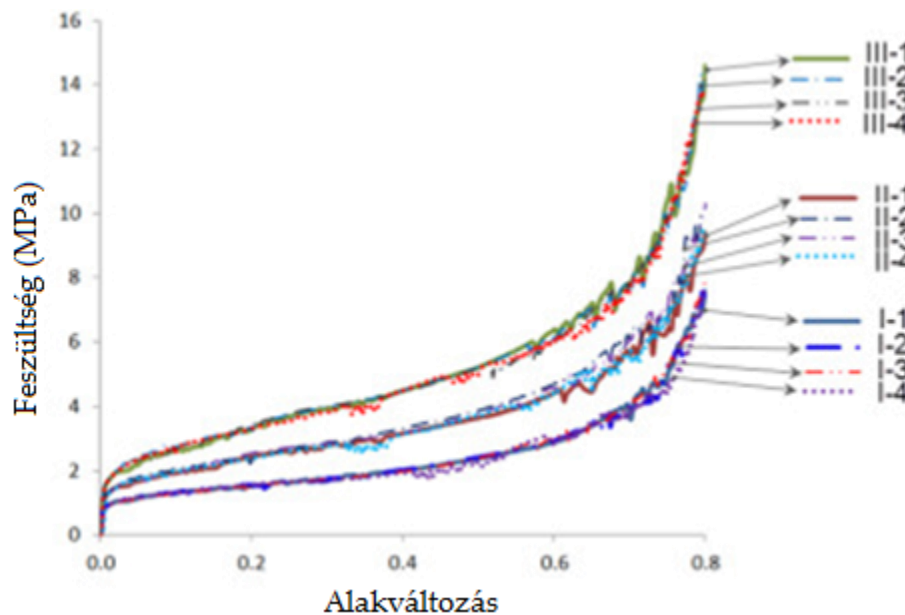


2.12. ábra A végelelemes szimuláció és a valós zömítési eredményeinek összehasonlítása mérnöki rendszerben Liu és társai nyomán [20]

A mérési eredmény és a szimulációból kapott eredmény jól illeszkedik egymáshoz, azonban még némi finomítást igényel. A kezdeti szakaszban alulbecsli a tényleges eredményeket, míg a második szakaszban pedig felülbecsli.

Ezt követően megvizsgálták, hogy mennyiben befolyásolja az üregekbe zárt gáz a zömítőgörbe értékeit. Ez a kérdés számomra is nagyon fontos, abból a szempontból, hogy kell e foglalkozni külön a bezárt gáz nyomásából adódó erőkkel. Az eredményeikből nyilvánvaló, hogy az ebből adódó feszültségnövekedés kvázi-statisztikus körülmények között elhanyagolható.

Az cikk utolsó szegmensében azzal foglalkoztak, hogy ha növelik a térkitöltést, és közben a falak arányait megtartják, az hogyan befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat. Tehát ez nem pusztán annak a vizsgálata, hogy a térkitöltés hogyan befolyásolja az értékeket, hanem azt is vizsgálták, hogy a falak magassága hogyan befolyásolja az értékeket, ha a vastagság/magasság arányt állandó értéken tartják. Az 2.13. ábra mutatja be a szimulációk eredményeit.



2.13. ábra Különböző térkitöltésű (római számok) és üregnagyságú (arab számok) végesselemben végzett szimulációk eredményei mérnöki rendszerben (Liu és társai nyomán) [20]

A jelöléseknél a római számok jelentik a különböző térkitöltést, míg az arab számokkal a változó magasságértékeket jelölték. Jól látszik, hogy a térkitöltés hatása nagyon jelentős, míg a falak magasságából származó különbségek elhanyagolhatók. Ez azt jelenti, hogy mindegy, hogy 2 mm-es átmérőjű gömbökkel vagy 0,15 mm-es átmérőjű gömbökkel töltjük ki a teret, a lényeg a térkitöltés lesz, és nem a gömbök között kialakuló falak magassága. Ez szintén értékes információ, mivel a kutatásomban többféle átmérőjű gömbhéjjal is foglalkoztam, és ha elegendő egyféle átmérőjű gömbbel kitöltött fémhabot modellezni, az nagyban csökkenti a számítási igényeket.

Összefoglalásként elmondható, hogy a szintaktikus fémhabok végesselemben szimulációi kezdetleges állapotban járnak, elsősorban a bonyolult térbeli felépítésnek, a gömbhéjak eltérő viselkedésének (törés / stabilitásvesztés) és az átmeneti réteg tulajdonságainak köszönhetően. A szakirodalmi adatokat összevetve arra a következtetésre jutottam, hogy a véletlenszerű gömbhéj elhelyezés elengedhetetlen egy jó modell megalkotásához, illetve az átmeneti réteg külön elemként történő modellezése nem feltétlenül szükséges. Ezeken kívül elmondható, hogy nagyon kevés információ áll rendelkezésre abból a szempontból, hogy a szimulációkat pontosan milyen peremfeltételek, és anyagtulajdonságok beállítása mellett hajtották végre, ami nagyban megnehezíti az elkészítendő modell létrehozását és összevetését a szakirodalomban találhatóakkal. Ez az információhiány főként annak tudható be, hogy ezek a szimulációk mind kiegészítő eredmények voltak a tényleges, fizikai mérésekhez.

2.6. A szintaktikus fémhabok folyásgörbéjének becslése

A szintaktikus fémhabok tulajdonságainak matematikai (analitikus) úton történő becslése még újabb terület, mint a végelemes modellezésük. Ellenben a szimulációval szemben sokkal nagyobb potenciál rejlik benne, hiszen ha sikerül egy használható elméletet kidolgozni, ami a mátrix- és az erősítőanyag tulajdonságai alapján becslést ad a belőlük gyártott fémhab tulajdonságaira az nagyban lecsökkenti a fejlesztési költségeket. Ebből kifolyólag a szakirodalomban is több forrás áll rendelkezésre ebben a témában, mint a végelemes szimuláció területén, de még így is rengeteg megválaszolatlan kérdés maradt.

Ferguson és társai [21] alumínium-oxid kerámia gömbhéjakkal erősített alumínium mátrixú szintaktikus fémhabokat vizsgáltak. A gömbhéjak térfogatkitöltésének arányának hatását vizsgálva a mechanikai tulajdonságokra állítottak fel egy elméletet, ami becsli a szintaktikus fémhabok szerkezeti merevségét illetve folyáshatárát. Az egyenletek kiinduló paraméterei minden esetben a mátrix és a gömbhéj mechanikai tulajdonságai voltak. Ebből a munkából csak a folyáshatár becslését emelem ki. Arra a következtetésre jutottak, hogy egy kritikus gömbhéj falvastagság / átmérő alatt a fémhab úgy viselkedik, mintha tisztán csak mátrixból állna porozitásokkal együtt. A kritikus határ felett (amelyet azonban az eredeti cikk szerzői sem közöltek) azonban a következő összefüggés szerint alakul a fémhab folyáshatára:

$$\sigma_p = \left[2A\%_m \sigma_m + A\%_s \eta \sigma_{fw} \right] \left(\frac{A_w}{A_s} \right) \quad (2.1.)$$

Ahol: σ_p – a fémhab folyáshatára, $A\%_m$ – a mátrix térkitöltése százalékban, σ_m – a mátrix folyáshatára, $A\%_s$ – a gömbhéj térkitöltése százalékban, η – a sérült gömbhéjakat korrigáló tényező, σ_{fw} – a gömbhéj falának törési szilárdsága, A_w – a gömbhéj falának területe, A_s – a gömbhéj területe a porozitással együtt (keresztmetszeti csiszolatból meghatározott értékek). Ez az összefüggés jó közelítést biztosított az általuk mért szintaktikus fémhabok esetében. Az $A\%_m$ és $A\%_s$ értékeket mikroszkópi képekről határozták meg.

Vogiatzis és társai [22] szintén kerámia gömbhéjjal erősített alumínium mátrixú fémhabokat vizsgáltak. Ők is matematikai úton, ugyanazon kiinduló paraméterek (mátrix és gömbhéj mechanikai tulajdonságai) felhasználásával vezették le a folyáshatár becslését. Az általuk javasolt összefüggés:

$$\sigma_{cth} = C \left(\frac{P_c}{3 \left(\ln \left(\frac{1}{1 - \rho_{sf}} \right) - A \right)} (1 - V_{ceno})^{\frac{3}{2}} + \sigma_{wall} V_{ceno} \left(1 - \left(1 - \frac{t}{R} \right)^3 \right)^{\frac{3}{2}} \right) \quad (2.2.)$$

Ahol: σ_{cth} – a fémhab folyáshatára, C – konstans, P_c – a gyártás során alkalmazott nyomás (nyomásos infiltrálással állították elő a mintáikat [22]), ρ_{sf} – a fémhab relatív sűrűsége, A – konstans, V_{ceno} – a gömbhéjak térkitöltése, σ_{wall} – a gömbhéjak falának törési szilárdsága, t – a gömbhéjak falvastagsága, R – a gömbhéjak sugara. Az így kapott értékeket összevetették az általuk mért nyomószilárdsági értékekkel és azt tapasztalták, hogy a jósolt és a mért értékek mérnöki szemszögből kielégítően közel esnek egymáshoz.

Marur [23] kifejezetten csak a szintaktikus fémhabok szerkezeti merevségének a becslésével foglalkozott. Az ő munkássága nagyon széleskörű volt, és sok oldalról közelítette meg ezt a kérdéskört. Külön figyelmet fordított az átmeneti rétegre, amelynek tulajdonságait jelenleg szintén csak becsülni lehet. Az elméleti modelljeit sokszor nem csak mérési eredményekkel, hanem végeselemes szimulációkkal is összehasonlította, sajnos azonban ezek a szimulációk számomra nem használhatóak, mivel csak egy-egy gömbhéj viselkedését vizsgálta.

Összefoglalásként elmondható, hogy ezek az elméleti, analitikus levezetések nagyon bonyolultak, és a legtöbb összefüggésben található olyan konstans érték, amit a mérési eredmények alapján határoztak meg. Ezen okok miatt, én egy gyakorlati központúbb becslést szeretnék adni a folyásgörbére, úgy, hogy a mérési eredményeinkkel összhangban legyen, és lehetőleg ne tartalmazzon validáló mérésekből származó konstansokat.

2.7. A szintaktikus fémhabok szerkezeti merevségének becslése analitikus módszerekkel

Az előző alfejezetben bemutatásra kerültek azok a módszerek, amelyekkel a folyáshatárt lehet becsülni, de ezek nagy része tapasztalati összefüggés. Ezzel szemben egy másik célkitűzésem volt, hogy az általam gyártott fémhabok szerkezeti merevségét analitikus módszerekkel is meg tudjam határozni.

Pal [24] kutatása nagyon jó bepillantást enged, hogy az egyes modellek, amelyek a részecskeerősítésű kompozitok effektív rugalmassági moduluszával foglalkoznak, milyen paramétereket vesznek figyelembe, és milyen elhanyagolásokkal élnek. Egyetlen szépséghibája a cikknek, hogy polimer mátrixú kompozitokkal foglalkozott, amelyek számomra nem relevánsak, azonban a modellek így is felhasználhatóak lehetnek.

A kiinduló gondolat abból áll, hogy van egy kompozitunk valamekkora erősítőanyag térkitöltéssel, majd ezt a térkitöltést egy végtelenül kis résszel megnöveljük. A rugalmassági moduluszbeli változás kiszámítható az alábbi képlet alapján, ami Christensen [25] munkájának egy módosított egyenlete:

$$\left(\frac{E}{E_m}\right) \left[\frac{ME_m - 3E_d(P+Q)}{ME - 3E_d(P+Q)} \right]^{N+\frac{53}{46}} \left[\frac{ME - 3E_d(P-Q)}{ME_m - 3E_d(P-Q)} \right]^{N-\frac{53}{46}} = e^{(2.5\phi)} \quad (2.3.)$$

Ahol, az E a kompozit rugalmassági modulusza, E_m a mátrixanyag rugalmassági modulusza, E_d az erősítőanyag modulusza, a ϕ pedig a térkitöltés. Az M , P , Q és N értékek pedig az alábbi összefüggésekkel írhatóak fel:

$$M = 46(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d) \quad (2.4.)$$

$$P = 4 - 23\nu_d \quad (2.5.)$$

$$Q = \sqrt{3(23\nu_d^2 - 138\nu_d + 82)} \quad (2.6.)$$

$$N = \frac{833 - 736\nu_d}{46Q} \quad (2.7.)$$

Ahol, ν_d az erősítőanyag Poisson tényezője. Az előbb felírt összefüggés abban az esetben lenne igaz, ha az újonnan berakott üregek nem lennének hatással egymásra, tehát olyan részre lehetne őket berakni ahol előtte még nem voltak. Ez természetesen csökken, ahogy növeljük a térkitöltést, így egy következő közelítést jelent, hogy a térkitöltés megváltozását $d\phi/(1-\phi)$ egyenlettel írjuk le. Ebben az esetben a 2.7. egyenlet a következő módon módosul.

$$\left(\frac{E}{E_m}\right) \left[\frac{ME_m - 3E_d(P+Q)}{ME - 3E_d(P+Q)} \right]^{N+\frac{53}{46}} \left[\frac{ME - 3E_d(P-Q)}{ME_m - 3E_d(P-Q)} \right]^{N-\frac{53}{46}} = (1-\phi)^{-2.5} \quad (2.8.)$$

Az összes egyenletnél érvényes, hogy annál a határértéknél kerestük a differenciálegyenletek megoldását, hogy a zéró térkitöltésnél, a mátrixanyag rugalmassági moduluszát kapjuk vissza. Ez a kritérium teljes mértékben megfelel a valóságnak. Ezzel az egyenlettel az a probléma, hogy a térkitöltés nem mehet a végtelenségig, mivel minden típusú formához meg lehet határozni egy maximális térkitöltést, amit el lehet

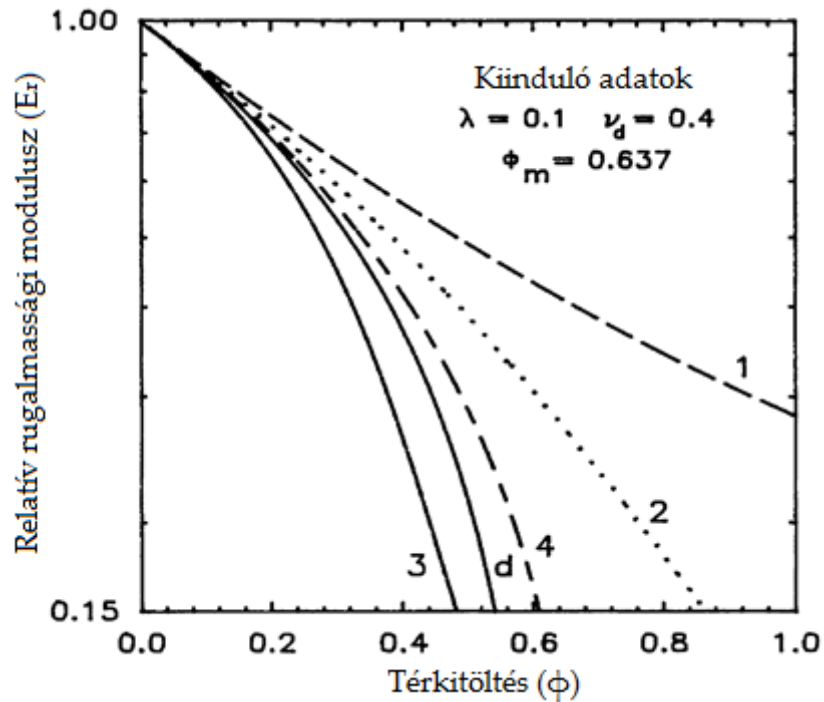
érni. Például a szabályosan lehelyezett azonos átmérőjű gömböknél ez az érték maximum 74% lehet, míg ha az ugyanilyen típusú gömböket véletlenszerűen helyezük le, akkor az elérhető térkitöltés mindössze 63,7% [31]. Ez az érték egy felső határként szolgál, és ezzel korrigálni kell a térkitöltés leírását az alábbi módon: $d[\phi/(1-\phi/\phi_m)]$, ahol a ϕ_m az a maximális térkitöltés, amit el lehet érni. Ezzel módosítva az előbbi képletet kapjuk a harmadik modellt:

$$\left(\frac{E}{E_m}\right) \left[\frac{ME_m - 3E_d(P+Q)}{ME - 3E_d(P+Q)} \right]^{N+\frac{53}{46}} \left[\frac{ME - 3E_d(P-Q)}{ME_m - 3E_d(P-Q)} \right]^{N-\frac{53}{46}} = e^{\left(\frac{2.5\phi}{1-\frac{\phi}{\phi_m}} \right)} \quad (2.9.)$$

Ez a modell már képes figyelembe venni az erősítő részecskék méretbeli szórását. Ennek a képletnek a módosulata a negyedik modell, amit Mooney [26] publikációjára hivatkozva hoztak létre. Ez mindössze annyiban tér el, hogy elhagyunk egy zárójelet, így a térkitöltés változását az alábbi képlettel számoljuk: $d\phi/(1-\phi/\phi_m)$. Ebből következik, hogy a 2.9. egyenlet az alábbi formát ölti:

$$\left(\frac{E}{E_m}\right) \left[\frac{ME_m - 3E_d(P+Q)}{ME - 3E_d(P+Q)} \right]^{N+\frac{53}{46}} \left[\frac{ME - 3E_d(P-Q)}{ME_m - 3E_d(P-Q)} \right]^{N-\frac{53}{46}} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{-2.5\phi_m} \quad (2.10.)$$

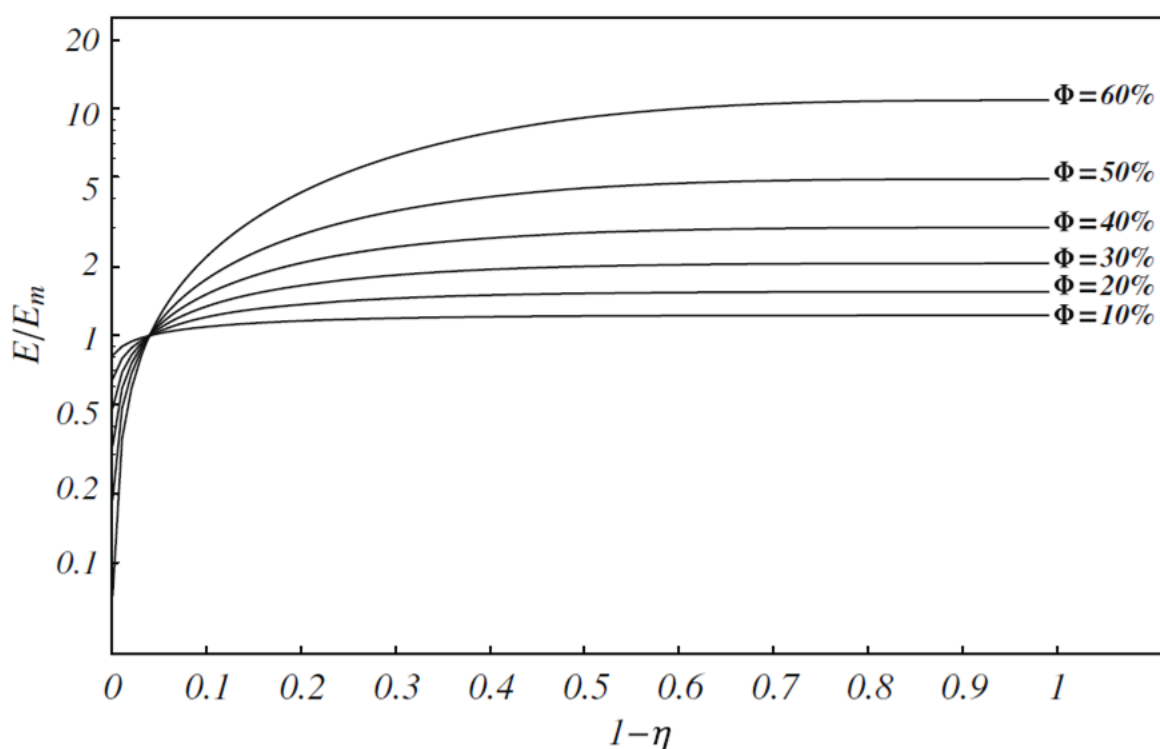
Ezek az egyenletek mindössze a mátrixanyag és az erősítőanyag mechanikai tulajdonságaitól, illetve a térkitöltéstől függenek. Ez számomra is a legfontosabb, hogy mérések nélkül lehessen meghatározni a habok mechanikai tulajdonságait. Ahhoz, hogy jobban érzékeltethető legyen az elméletek közötti különbség, Pal egy diagramban ábrázolta a relatív rugalmassági modulusz értékeket a térkitöltés függvényében [24]. Ezt mutatja be a 2.14. ábra.



2.14. ábra A relatív rugalmassági modulusz változása a térkitöltés hatására. A különböző számok a különböző modelleket jelölik, míg a d jelű görbe egy olyan habot ír le, melyben az üregek nem hatnak egymásra (Pal nyomán) [24]

A számok a különböző modelleket jelentik abban a sorrendben, ahogy én is bemutattam őket. A d jelű görbe pedig egy olyan egyenlet, amiben az üregek nem hatnak egymásra. A λ az erősítőanyag és a mátrixanyag rugalmassági moduluszának hányadosát jelöli. Ezt az egyenletet Christensen munkájából vette át a szerző. Ez az ábra egy jó kiindulópont számomra is, mivel a megfelelő paraméterekkel én is könnyen leellenőrizhetem, hogy az adott modell milyen jól közelíti a mérési eredményeimet.

Porfiri és Gupta [27] egy olyan modellből indult ki, ahol az üregek nem hatnak egymásra, akár csak Pal tette. Ugyanazokra az egyenletekre jutott, mint Pal, csak a jelölései voltak mások. Azért emelem ki mégis ezt a cikket, mert külön vizsgálta a gömbhéjak falvastagságának hatását a rugalmassági moduluszra. Ezt mutatja be a 2.15. ábra.



2.15. ábra A gömbhéjak falvastagságának hatása a rugalmassági moduluszra, különböző térkitöltés értékeknél [27]

A ϕ jelöli a térkitöltést, míg az η a belső és külső sugarak hányadosa. Tehát az $\eta=0$ tartozik a tömör gömbökhöz, és az $\eta=1$ pedig a tiszta üregekhez. Az ábrán $1-\eta$ és E/E_m van feltüntetve, tehát ahol a görbe metszi az egyes vonalat, onnantól erősíti a mátrixanyagot a gömbhéj. Ez nagyságrendileg 0,04 körül következik be, tehát az $\eta=0,96$ -nál, vagyis már a nagyon vékony falú gömbhéjak is érzékelhető hatást fejtenek ki. Ez egy nagyon érdekes eredmény, megjegyzendő azonban, hogy ők is csak polimer mátrixú anyagokat vizsgáltak és az eredményeik egy az egyben nem átvihetők az én kutatásomba. Mindazonáltal nagyon figyelemreméltó eredmény az is, hogy egy bizonyos falvastagság felett milyen kicsi az erősítés mértéke (a görbék térkitöltéstől függően más-más átmérőarányánál erősen ellaposodnak). Egy másik szembevetendő jelenség, hogy milyen nagymértékben befolyásolja az elérhető rugalmassági modulusz értékét a térkitöltés. Ahogy az ábráról is látszik, a rugalmassági modulusz csökkenése exponenciális a térkitöltéssel, ahogy az Pal modelljeiből is látszódott.

Bardella és társai [28] öt elméletet hasonlítottak össze egy végeselemes szimuláció eredményeivel. A vizsgált tulajdonságok közül számomra a legérdekesebb a dimenzióatlanított kompresszibilitási modulusz volt. Három elmélet eredményei közel haladtak egymáshoz, ezek voltak a Mori-Tanaka féle becslés (MT), a klasszikus önkonzisztens becslés (CSC), valamint a differenciális önkonzisztens becslés (DSC). Ezekben az elméletekben a kompresszibilitási modulusz (K) illetve a csúsztató rugalmassági modulusz (G) volt meghatározva, amiből a rugalmasságtan alapösszefüggéseivel vissza lehet számolni a rugalmassági moduluszra.

A Mori-Tanaka becslés összefüggései:

$$K^{MT} = \frac{(1-f)K_m + f(1-\eta^3) \frac{3K_f K_m}{(3K_f + 4G_m)\alpha_m}}{f\eta^3 \frac{3K_m}{4G_m} - f(1-\eta^3) \frac{3(K_f - K_m)}{3K_f + 4G_m} + 1} \quad (2.11.)$$

$$G^{MT} = \frac{(1-f)G_m + f(1-\eta^3) \frac{G_m}{\left(1 + \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6G_f(K_m + 2G_m)}\right)}\beta_m}{f\eta^3 \frac{6(K_m + 2G_m)}{9K_m + 8G_m} - f(1-\eta^3) \frac{G_f - G_m}{G_f + \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)}} + 1} \quad (2.12.)$$

Ahol, az alsó indexben az f a fal tulajdonságait jelöli, míg az m a mátrixanyagéra vonatkozó adatokat. Az α és a β meghatározhatóak a kompressziós modulusból, valamint a csúsztató rugalmassági modulusból az alábbi összefüggések szerint:

$$\alpha = \frac{3K}{3K + 4G} \quad (2.13.)$$

$$\beta = \frac{6(K + 2G)}{5(3K + 4G)} \quad (2.14.)$$

Ez a két egyenlet a többi becslésre is vonatkozik (2.13. és 2.14. egyenlet). A klasszikus önkonzisztens becslés összefüggései:

$$\frac{f\eta^3}{1-\alpha_{CSC}} + \frac{f(1-\eta^3)}{1+\alpha_{CSC}\left(\frac{K_f}{K^{CSC}}-1\right)} + \frac{1-f}{1+\alpha_{CSC}\left(\frac{K_m}{K^{CSC}}-1\right)} = 1 \quad (2.15.)$$

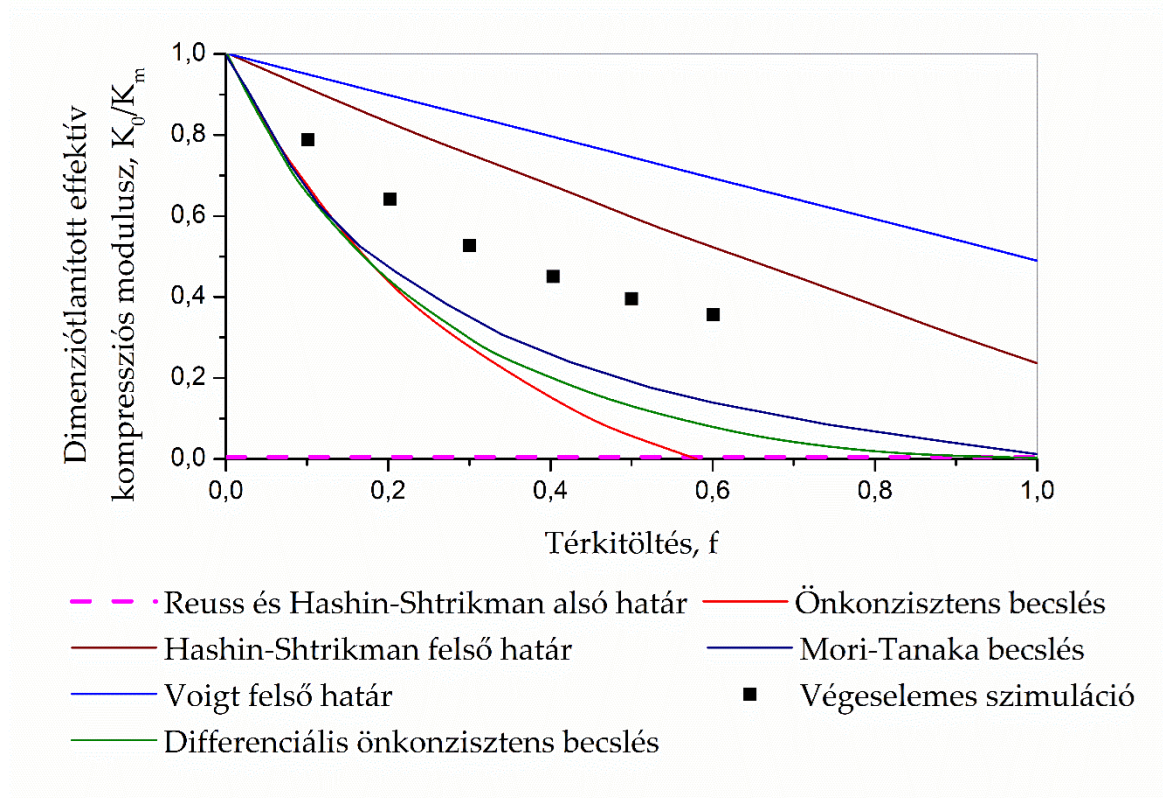
$$\frac{f\eta^3}{1-\beta_{CSC}} + \frac{f(1-\eta^3)}{1+\beta_{CSC}\left(\frac{G_f}{G^{CSC}}-1\right)} + \frac{1-f}{1+\beta_{CSC}\left(\frac{G_m}{G^{CSC}}-1\right)} = 1 \quad (2.16.)$$

A differenciális önkonzisztens becslés összefüggései:

$$\frac{dK^{DSC}(s)}{ds} = \frac{1}{1-s} \left(\frac{(1-\eta^3)K^{DSC}(s)[K_f - K^{DSC}(s)]}{K^{DSC}(s) + \alpha_{DSC}(s)[K_f - K^{DSC}(s)]} + \frac{\eta^3 K^{DSC}(s)}{\alpha_{DSC}(s) - 1} \right) \quad (2.17.)$$

$$\frac{dG^{DSC}(s)}{ds} = \frac{1}{1-s} \left(\frac{(1-\eta^3)G^{DSC}(s)[G_f - G^{DSC}(s)]}{G^{DSC}(s) + \beta_{DSC}(s)[G_f - G^{DSC}(s)]} + \frac{\eta^3 G^{DSC}(s)}{\beta_{DSC}(s) - 1} \right) \quad (2.18.)$$

A kutatásuk során, a különböző térkitöltések mellett vizsgálták a fémhabok tulajdonságait, ezt mutatja be a 2.16. ábra.



2.16. ábra Bardella és társai [28] eredménye a dimenziótlanított kompressziós modulusra vonatkozóan a térkitöltés függvényében.

Nagyon szembeötlő a különbség a végelemes modell és az elméletek értékei között. Valószínűleg a minta nagysága, illetve az, hogy szabályosan voltak elhelyezve a gömbök jelentősen befolyásolták az eredményt, azonban a trendet tekintve jó az egyezés, ami jó kiindulási alapot jelent számomra.

Ez a cikk remek átfogó képet adott a napjainkig megjelent elméletekről, amik a fémhabok rugalmassági tulajdonságainak meghatározására tettek kísérletet. Igaz hogy

nem adtak olyan jó közelítést, mint az előző fejezetekben bemutatott empirikus összefüggések, ellenben nagy előnyük, hogy nincs bennük olyan konstans, amihez külön mérések kellenek. Ennek fényében azt látom célravezetőnek, ha az empirikus összefüggésekben szereplő értékeket valamilyen analitikus módszerrel alá lehet támasztani. Az elméletek közül később csak a Mori-Tanaka becsléssel, az önkonzisztens becsléssel, valamint a differenciális önkonzisztens becsléssel fogok foglalkozni, mivel ezeknek a becsléseknek az értékei közel együtt futnak. A Voigt és a Hashin-Shtrikman felső határ, valamint a Reuss és Hashin-Shtrikman alsó határ nagyon messze állnak a mért értékektől. Ezek a becslések nagyon alul és felülbecsülik annak érdekében, hogy a mérések során tapasztalt nagy szórás értékek is mindenképpen ezen határok közé essen, azonban tervezési szempontból ezek a becslések nem relevánsak.

3. SZINTAKTIKUS FÉM HABOK VÉGESELEMES MODELLEZÉSE

Ebben a fejezetben bemutatásra kerül egy $H = 14$ mm magas, $D = 14$ mm átmérőjű zömítő próbatest ($H/D = 1$) a 3D-s modell megalkotásától kezdve a végeselemes szimuláció összeállításáig és eredményeiig. A mátrixanyagokat, illetve a jelölésrendszert egy korábbi munkámból vettem [1], ahol 4 féle mátrixanyaggal dolgoztam és kétféle hőkezeltégi állapottal, utóbbiak jelölései: O – lágyított, T6 – öregített. Így a teljes fémhab jelölések a következőképpen néznek ki: Al99,5, AlSi12, AlMgSi1-O, AlMgSi1-T6, AlCu5-O, AlCu5-T6.

3.1. A gömbhéjak kiosztása

Az első nehézségek már a modell megalkotásával adódtak, hiszen minél jobban akarunk közelíteni a valóság felé, annál bonyolultabb lesz a modell. A szakirodalom kutatás során látható volt, hogy amennyiben a gömbhéjakat szabályos rendbe helyezzük el az nem ad megfelelő közelítést. Ez abból adódhat, hogy ha szabályosan helyezzük el őket, akkor kialakulnak síkok, amikben a gömbhéjakra ugyanakkor feszültség jut, így valószínű, hogy egyszerre fog az összes gömbhéj tönkre menni, ami az adott síkban van. Ezen felül, a cikkek nagy részében a gömbhéjak átmérőjét se változtatták.

Ennek a kiküszöbölése érdekében először C++ programnyelvben írtam egy programot, ami véletlenszerűen helyezi el a gömbhéjakat. Első lépésként ez a program, egy mikrométeres térbeli hálóval osztja fel az általam megadott térfogatú hasábot az x, y, és z irányban is. Ahol ezek a hálók metszik egymást, ott csomópontok alakulnak ki, és ezek a csomópontok lehetnek majd a gömbhéjak lehetséges középpontjai. A következő lépésben beállíthatjuk, hogy egy újonnan lerakandó gömbhéj milyen messze legyen a többi gömbhéjtól. Itt egy tartományt kell megadni, amire azért van szükség, mert ha túl távol helyezi egymástól a gömbhéjakat, akkor nem érjük el a kívánt térkitöltést, ellenben ha összeérnek a gömbhéjak, akkor a szinguláris pontok miatt nem lehet behálózni a modellt. A tapasztalatok azt mutatták, hogy minimum 10 mikrométeres távolságot kell hagyni a gömbök között. Minél kisebb a maximális távolság értéke, annál nagyobb térkitöltés érhető el, azonban ahogy csökkentjük ezt az értéket, úgy exponenciálisan növekszik a program futási ideje, így az optimális maximális távolságra 50 mikrométer adódott. Így alakult ki az a 10-50 mikrométeres sáv, amibe lehelyezésre kerülhetnek a gömbhéjak. Azonban ez a kritérium is kevés lenne, mivel ha csak egy gömbhéjhoz lenne mindig ilyen közel az újonnan elhelyezett gömbhéj, könnyen elképzelhető olyan eset, hogy nem kapunk megfelelő térkitöltést, mivel pont oda akarja a program elhelyezni a gömbhéjat, hogy a már lerakott gömbhéjak közé pont nem fér be több. Ennek kiküszöbölésére egy másik kritérium is szerepel a programban. Ez a kritérium úgy működik, hogy a második gömbhéj lehelyezése után, már ellenőrzi, hogy mind a két gömbhéjhoz elég közel van-e a lerakandó új gömbhéj. Amennyiben igen,

akkor leengedi rakni, azonban ha csak az egyikhez, akkor nem. Amint a harmadik gömbhéjat is lerakta a program a kritérium tovább módosul, mégpedig úgy, hogy a már lerakott három gömbhéjhoz legyen elég közel a lerakandó negyedik. Ezt követően nem módosul a kritérium mivel, ha három gömbhéjhoz elég közel van, akkor a középpontjaikat összekötő egyenesek egyértelműen kijelölnek a térben egy pontot, így felesleges több gömbhéjhoz való kapcsolódást keresni. A túrésmező miatt elképzelhető, hogy az újonnan lerakott gömbhéj többhöz is elég közel kerüljön, de ennek a valószínűsége elenyészően kicsi.

Ezekkel a kritériumokkal előállt a program magja, azonban egy vizsgálat még hiányzik. A legtöbb időt a gömbhéjak középpontja, és az újonnan kiválasztott pont közötti távolság számítása teszi ki. Ez különösen igaz lesz, amint a gömbhéjak száma meghaladja a százas nagyságrendet. Mivel ennyi vektoriális számítást kell végrehajtani, ezért egy Matlab kódot is írtam a probléma megoldására.

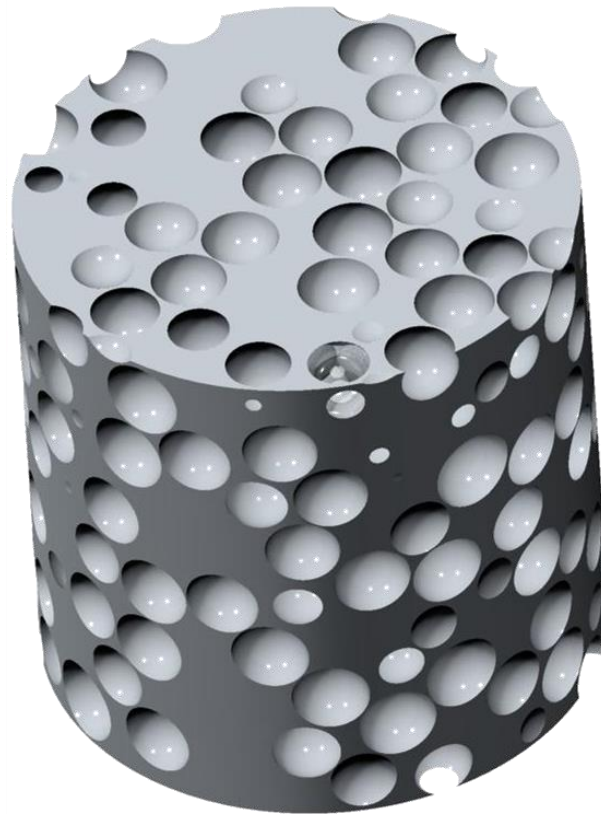
A Matlabban is megalkottam a kritériumokat, azonban a gömbhéj lehelyezését a program itt nem rácspontra akarja megtenni, hanem véletlenszerűen választott koordinátákba a megadott térfogaton belül. Azt tapasztaltam, hogy a Matlab kód gyorsabban számol, mint a C++-ban írt kód. Azonban felmerült egy másik probléma. Egy bizonyos gömbhéj szám felett a számítási idő nagyon megnőtt (akárcsak a C++ kód esetén, amiért elkezdtem a Matlabbal foglalkozni). Ezt kiküszöbölendő úgy módosítottam mindkét programot, hogy sávokként töltsék fel a teret. Ahhoz, hogy a sávok eltolásánál ne alakuljanak ki rossz felületek, egy 2 mm-es átfedést hoztam létre. Tehát ha a sávomat a z irányban mozgatom és mondjuk 10 mm magas, akkor a következő sáv 8-18mm-ig fog tartani. Ezzel a rendszerrel akármekkora mintát létre lehet hozni anélkül, hogy a számítási idő nagyon megnőne, mindössze lineárisan fog változni a minta méretével, ami nagy előrelépés.

Mind a két módosított programot kipróbáltam és még mindig a Matlab bizonyult a gyorsabbnak. Valószínűleg azért, mert a távolságszámításokat gyorsabban tudta számolni vektoriálisan, mint a C++ program. Annak érdekében, hogy minél valóságosabb legyen, a gömbhéj átmérő értékeket véletlenszerűen hívja be mind a két program egy fájlból. Ebben a fájlban 700 gömbhéj átmérő értéke található meg, amiket egy korábbi kutatás során mértem le (a gömbhéj átmérők Gauss-eloszlást követnek) [1]. Azonban ez kevés érték lenne, ezért ezt a 700 értéket többször egymás után másoltam. Végeredményben a program egy szövegfájl ad, amelyben megtalálható a gömbhéjak x, y, és z koordinátája illetve a hozzá tartozó átmérő érték, és a sorszámuk. A program helyességét mutatja az is, hogy a szakirodalomban meghatározott 64 tf%-os térkitöltést [30, 31] sikerült elérni vele.

A 11.1 fejezetben illetve a 11.2 fejezetben megtalálhatók a C++ illetve a Matlab programkódok.

3.2. A 3D-s modell és a végelemes háló létrehozása

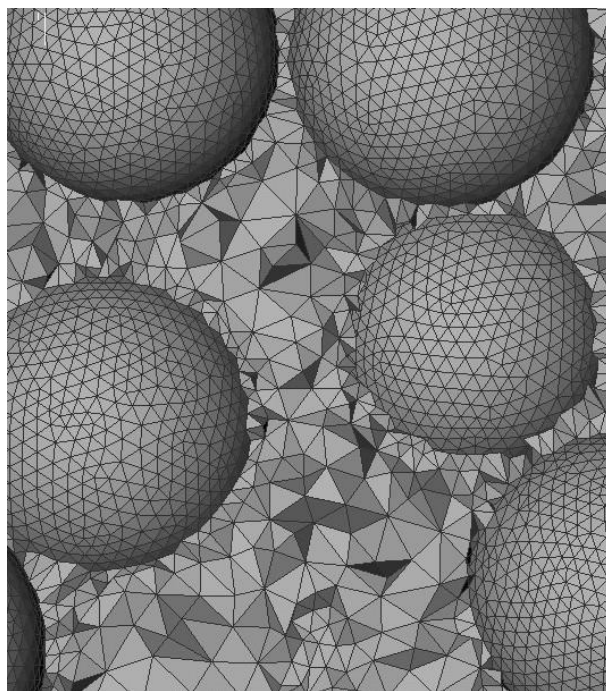
A kiadott szövegfájl segítségével létre lehet hozni a tényleges 3D-s modellt. Ehhez első lépésben csak a gömbhéjakat tartalmazó fájlt hoztam létre a Creo Parametric 3.0 programban. Ezt követően egy új fájlban egy 14 mm átmérőjű és 14 mm magas hengert hoztam létre. Ebből kivontam a „merge” paranccsal a gömbhéjakat, így elkészült a fémhab geometriai modellje. Ezt mutatja be a 3.1. ábra.



3.1. ábra Creo Parametric 3.0 programmal készült modell $H/D=1$ zömítő próbatestről

Ezt a geometriai modellt STEP formátumban kimentettem majd ezt az ANSA nevű hálózó programba betöltöttem. Itt első lépésben (ha szükséges volt) manuálisan javítottam a geometriát, például némelyik felületet nem importálta be helyesen a program és ezeket nem tudta volna behálózni, ezért ezeket újra kellett definiálni, ezt követően pedig beállítottam a hálózás paramétereit. A felületi háló megalkotásánál az elemméretek megadásánál többféle méretet is kipróbáltam, amivel a modell elemméretre való érzékenységét teszteltem. A háromszög elemek oldalhosszúságát 0,08-0,3 mm között változtattam. Azért volt szükség ilyen kis elemméretre, mert a gömbhéjak között a legkisebb távolság 0,05-0,10 mm-ig terjed. Látszik, hogy az elemméret még mindig nagyobb volt, mint maga a rés, de ez nem okoz problémát, mivel ilyenkor az átlagos elemméretet adjuk meg, ha nem fér be ekkora él hosszúságú elem, akkor kisebb lesz

az az éle, de ez torzulást fog okozni, amit minél kisebbre célszerű venni. Ebből a szempontból ez a méret is nagynak mondható, de már így is feszegettem az ésszerűen kezelhető elemszámok határát. Az így létrehozott, tisztán háromszögelemekből álló felületi hálóból kiinduló térfogati hálót hoztam létre, amelynél a maximális oldalhosszúságot 2 mm-re állítottam be, és a növekedési faktort (ami azt jelenti, hogy a például 0,1 mm-es felületi háló és a 2 mm-es irány elem él hossz között milyen gyorsan növekedjenek az elemek él hosszai) pedig kettesre. Ezt követően csak a térfogatelemekre volt szükségem így a többit kitöröltem. A kezdeti felületi háló finomságának a függvénye az egész testre kiterjedő 3D-s végelelemes háló elemeinek száma, amely így 300 ezer - 4,5 millió tetraéder elemet tartalmazott (3.2. ábra).



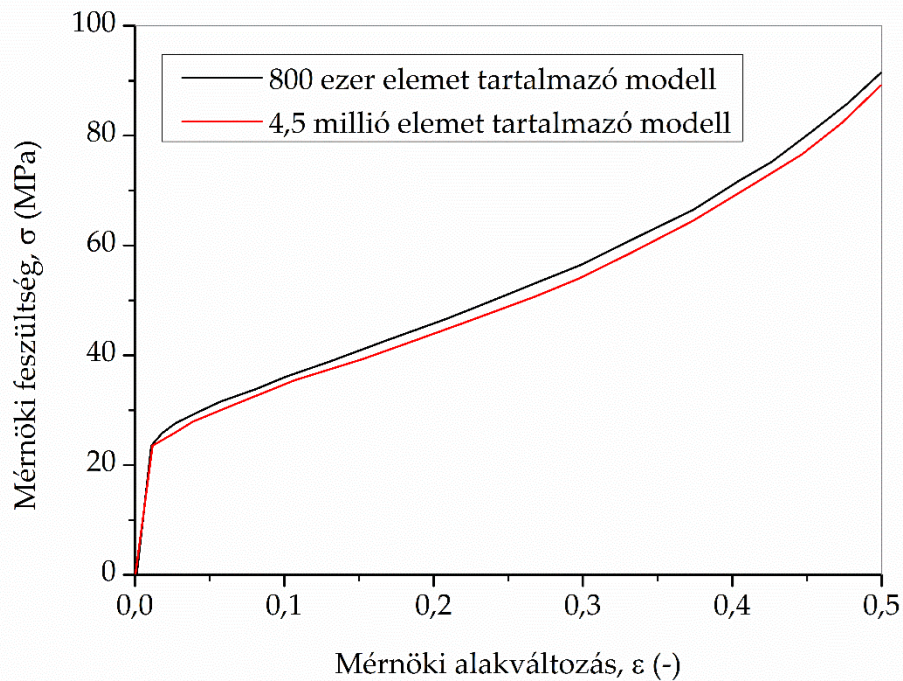
3.2. ábra ANSA-ban készített végelelemes háló kinagyított része

Azért csak a mátrixot modellezem (csak tetraéder elemeket tartalmaz a modell), mivel a szakirodalomból látható, hogy ha a gömbhéj falvastagsága kicsi, akkor a szilárdsági értékeken történő módosításai elhanyagolhatóak [20]. Egy másik szempont volt, hogy a 4,5 milliós elemszám már olyan nagy, hogy a szimuláció a tanszéki nagyteljesítményű serveren is napokig futott. Ha a gömbhéjakat is beleraktam volna a modellbe, az annyira elnyújtotta volna a számítási időt, hogy akár hetekig is futott volna egyetlen számítás.

3.3. A végelelemes modell létrehozása

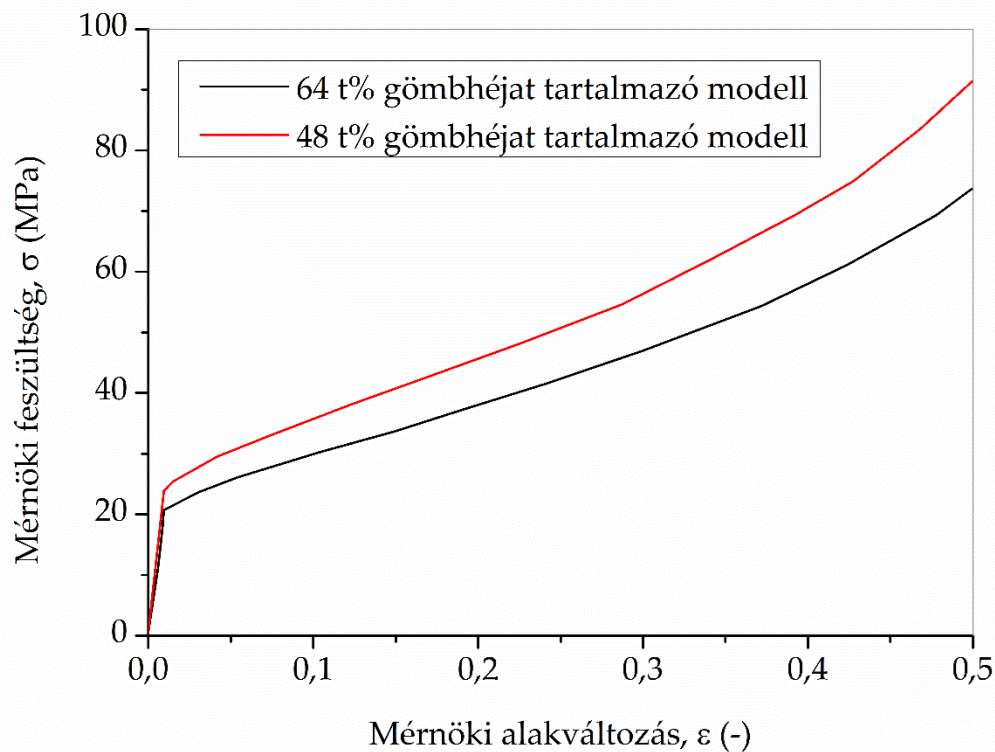
Az előző pontban definiált végelelemes hálót importáltam be az MSC Marc Mentat programba. Itt először geometriai paramétert adtam neki, 3D tömör testté alakítottam.

Ezt követően létrehoztam két síkot, amelyek a zömítésnél a szerszámot fogják helyettesíteni. Ezeket a síkokat merev testekként modelleztem, ami közel áll a valósághoz. A mátrix anyagának beállítása volt a következő lépés. Itt a korábbi kutatásaimból kiindulva [29], a külön kimért adatok alapján definiáltam saját anyagparamétereket. Az érintkezéseknél azt állítottam be, hogy a mátrix és a lemezek között nincs súrlódás, tehát tökéletes a kenés, míg az önmagával való interakció során „glue” kontaktot, tehát tapadást adtam meg. Különböző lépéslefutásokat készítettem, a modellt kipróbáltam mind adaptív mind fix időléptetéssel (az adaptív időléptetésnél a program választja meg, milyen időpillanatokban számolja ki az értékeket, míg a fix időléptetésnél csak az általam meghatározott időpillanatokban fogja ezt megtenni), és azt tapasztaltam, hogy a fix időléptetéssel jobban kiértékelhető eredményeket ad, ellenben valamivel tovább tartott a számítás, mint az adaptív lépések esetén. Az eredményeknél külön figyelmet fordítottam az alakváltozás és a feszültség kimutatására. Nagy alakváltozásokat tételeztem fel (ami azt jelenti, hogy a terhelő erő követi a geometriai torzulásokat), emellett a megoldáshoz az aktualizált Lagrange-féle megoldást alkalmaztam (ami azt jelenti, hogy az elmozdulás mezőt az előző pillanatból kiindulva határozza meg, nem pedig a nulla időpontból), mégpedig úgy, hogy a mátrixmegoldó iteratív volt. Az így elkészített szimulációt 10 szálon futtattam a tanszéki szervergépen. Attól függően, hogy a modell mennyi elemet tartalmazott a számítási idő 16 órától 7 napig terjedt. Sikerült kimutatnom, hogy a legpontosabb számítást a legfinomabb háló adta, ahogy azt várni lehetett, ellenben 3%-os eltérést mutatott a 0,15 mm-es felületi hálóból kiinduló modell, ami mindösszesen csak 800 ezer elemet tartalmazott. Ez az eltérés elfogadható mértékű, annak tekintetében, hogy ennek a számítási ideje mindösszesen egy nap volt, ezért a következőkben csak ezzel a hálótípussal kapott eredményeket fogom összehasonlítani. A legfinomabb háló illetve a 800 ezer elemet tartalmazó háló végeeselemes szimulációjából kapott mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbét mutatja be a 3.3. ábra.



3.3. ábra Két különböző finomságú hálóval végzett szimulációból kapott mérsőki feszültség – mérsőki alakváltozás diagram

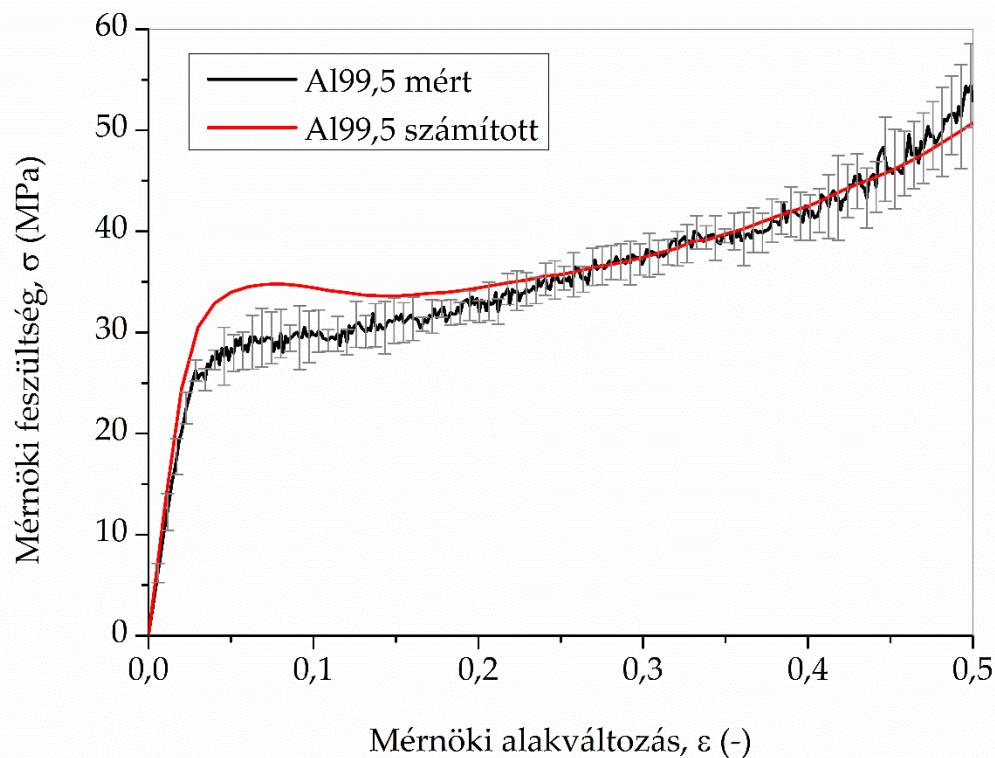
Következő lépésként teszteltem, hogy mennyit számít a térkitöltés. Ezt úgy oldottam meg, hogy kiosztottam 64 térfogat százaléknvi (tf%) gömbhéjat, majd ezekből kitöröltem 16 tf%-ot. Azért ennyit töröltem ki, mert korábbi kutatásom alapján azt tapasztaltam, hogy a gömbhéjak ~16 tf%-a sérült [1]. Így kaptam két adatsort, egy eredetit, illetve egyet, amelyet módosítottam. Mindkét esetre előállítottam a modellt, majd elvégeztem a szimulációt. A számításokból kapott mérsőki feszültség – mérsőki alakváltozás görbéket közös diagramban ábrázoltam (3.4. ábra).



3.4. ábra A térkitöltés hatása a mérsőki feszültség – mérsőki alakváltozás görbére

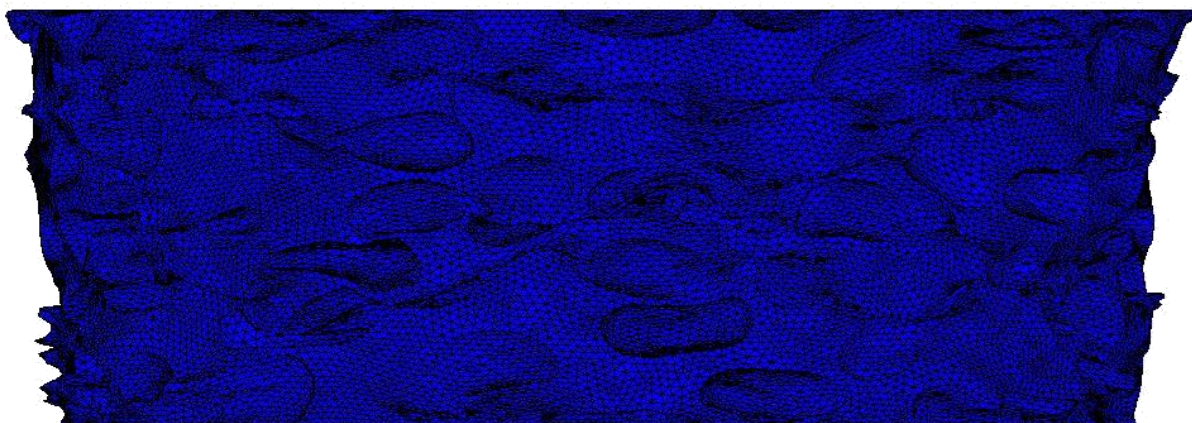
Ahogy arra számítani lehetett, a görbe alakja nem sokat változott, mindösszesen el lett tolva. Ez a trend egybeesik a szakirodalomban látott adatokkal, tehát a szimuláció ilyen szempontból sikeresen vizsgázott.

A görbék alakja egyértelműen hasonlít a mért eredményekre, így már sejteni lehet, hogy ez az eljárás jól fogja reprezentálni a valóságot. Itt azonban még túl gyors a felkeményedés. A következő lépésben a Bonora-féle tönkremeneteli modellt állítottam be a mátrixanyaghoz (ami a tönkremenetel során kialakuló mikroüreg képződéssel számol), így a következő eredményt kaptam (3.5. ábra):

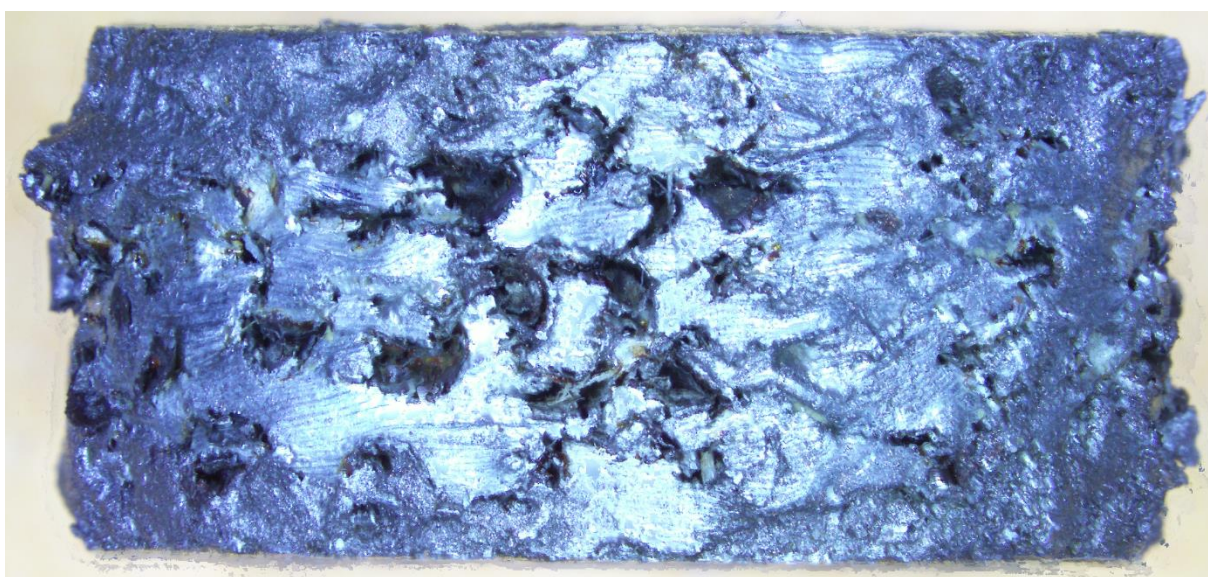


3.5. ábra Az Al99,5 mátrixú szintaktikus fémhab mért illetve végesselemes szimulációból kapott mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás görbéje

A Bonora-modell alkalmazásával, már megfelelő közelítést kaptam. Nemcsak az mérnöki feszültség – mérnöki alakváltozás eredmények voltak hasonlóak, hanem a próbatest megjelenését tekintve is szinte megegyezett a szimuláció és a valóság (3.6. ábra, 3.7. ábra). Ezen eredmény alapján kijelenthető, hogy ezekkel a paraméterekkel és hálózással jól lehet szimulálni a fém gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabokat.



3.6. ábra Az Al99,5 mátrixú szintaktikus fémhab szimuláció utáni alakja



3.7. ábra Az Al99,5 mátrixú szintaktikus fémhab zömítés utáni makrofotója [29]

Azonban egy bonyolultabb alak esetén már a kezelhetőség határát súrolná az elemszám, ebből kifolyólag érdemes lenne egy olyan modellt kidolgozni, hogy ne kelljen a gömbhéjakat külön – külön modellezni, hanem egy egyszerűbb geometriával is el lehetessen érni ugyanazokat az eredményeket. Ehhez szükség van az adott fémhab folyásgörbéjére. Amint megvan ez a folyásgörbe, már egyszerűsíthetünk a modellen. Az általam megalkotott modellel ez a folyásgörbe meghatározható, így két lépésből már bármilyen fémhab könnyen modellezhető.

4. A FOLYÁSGÖRBE BECSLÉSE

4.1. A vas gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok Watts-Ford vizsgálata

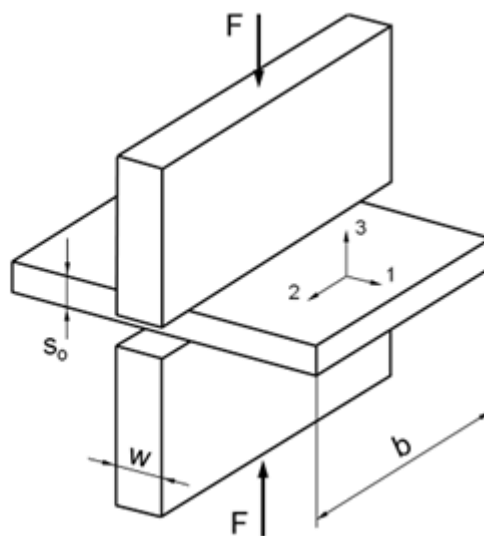
Ahhoz, hogy egy megfelelő becslést tudjak adni a fémhabokra, szükségesnek tartottam validálni a folyásgörbét egy másik vizsgálattal is. Ehhez a Watts-Ford-féle mérést választottam. Ebben a mérésben egy lemezt zömítünk nyomószerszámok között a következő elrendezésben:

Feltételek:

$$\begin{aligned} b/w &> 6 \\ 2 < w/s &< 4 \end{aligned}$$

Szerszám méretek:

$$w = 10 \text{ mm}, 6 \text{ mm}$$



4.1. ábra A Watts-Ford mérés elrendezése, valamint a mérés érvényességének feltételei [32]

Két próbatesten végeztem el a Watts-Ford mérést, amelyek mátrixanyaga AlSi12 volt, illetve a kiinduló méretei a szélessége irányban 35 mm, hosszirányban (b) pedig 58 mm. A vastagságirányú méreteiket valamint a hozzá tartozó erőértékeket a 4.1. táblázat foglalja össze. Minden erőértékhez egy vastagságérték tartozik, és ezekből az adatokból kiszámíthatók az alakváltozás és alakítási szilárdság értékek az alábbi összefüggések (4.1. és 4.2. egyenlet) segítségével:

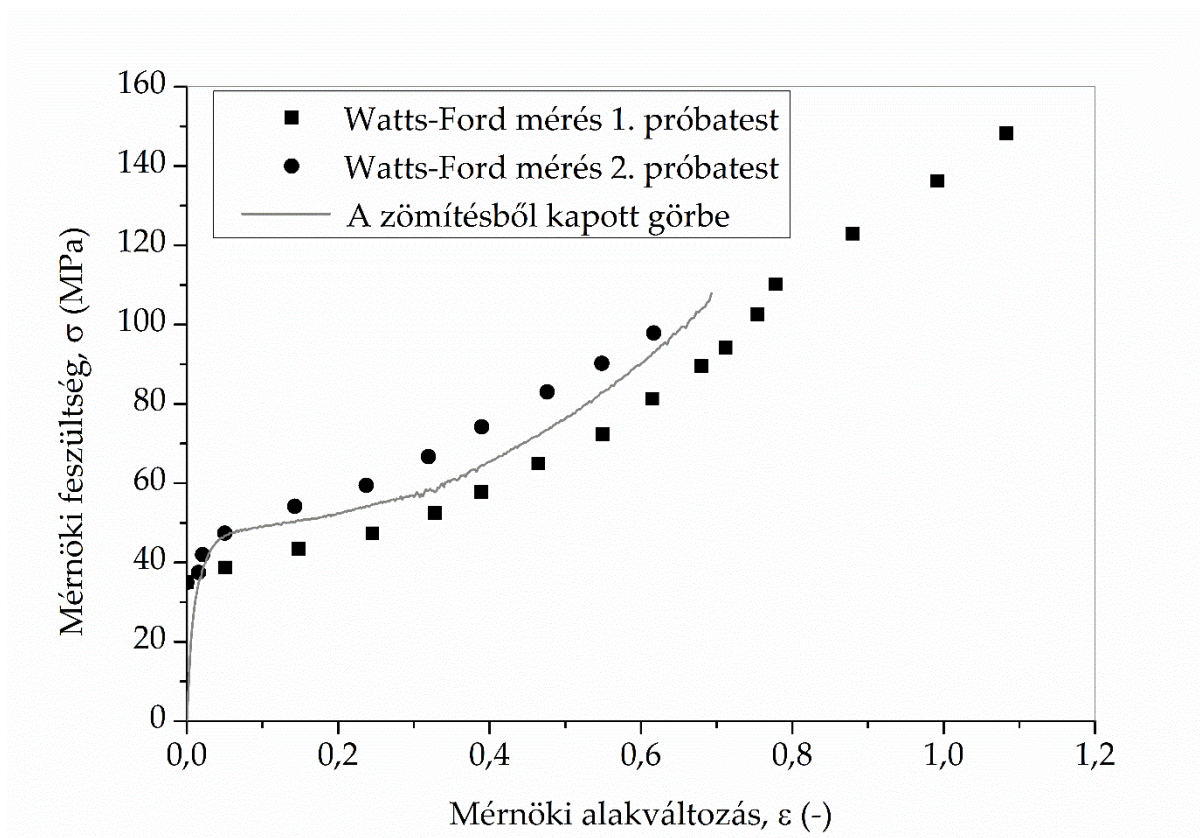
$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{s_0}{s} \quad (4.1.)$$

$$k_f = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{F}{b \cdot w} \quad (4.2.)$$

4.1. táblázat A Watts-Ford mérés eredményei

	1. próbatest		2. próbatest	
Szerszám vastagsága, w (mm)	Vastagság, s (mm)	Erő, F (kN)	Vastagság, s (mm)	Erő, F (kN)
10	4,65	0	4,47	0
10	4,45	26,3	4,41	25,48
10	4,09	29,5	4,39	28,5
10	3,76	32,14	4,28	32,2
10	3,5	35,6	3,95	36,8
10	3,32	39,2	3,64	40,4
10	3,11	44,1	3,39	45,3
10	2,89	49,18	3,19	50,4
10	2,73	55,2	2,96	56,4
10	2,58	60,8	2,78	61,3
10	-	-	2,62	66,5
6	2,51	38,4	-	-
6	2,42	41,8	-	-
6	2,37	44,9	-	-
6	2,17	50,1	-	-
6	1,97	55,5	-	-
6	1,82	60,4	-	-

A Watts-Ford mérés valamint a kvázi statikus zömítés eredményeit a jobb áttekinthetőség érdekében egy diagramban ábrázoltam (4.2. ábra).



4.2. ábra A Watts-Ford mérésből és a zömítő vizsgálatból kapott eredmények ábrázolása egy diagramban

Jól látszik, hogy az eredmények meggyőző hasonlóságot mutatnak. Ebből következik, hogy a zömítővizsgálat során is elhanyagolhatóak voltak a súrlódásból adódó hibák. Ez egy nagyon fontos eredmény, mivel igazolja, hogy az összes mérés, amit kvázi statikusan elvégeztem [1] mind jó eredményeket szolgáltatott. Kiemelem a két próbatest közötti különbséget, mivel ez nem elhanyagolható. Ez a különbség abból adódhat, hogy a kialakított próbatest vastagsága alig haladja meg a gömbhéj átmérő kétszeresét, ezért nagyon jelentős a gömbhéjak mérethatása, ami a mért értékek szórását megnövelheti. Azonban a zömítésből származó értékek a Watts-Ford vizsgálat értékei között futnak, ami jó eredmény.

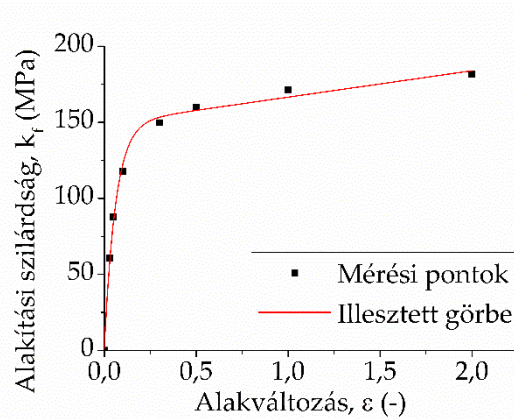
4.2. A vas gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok folyásgörbéjének becslése

A szakirodalomban csak olyan összefüggéseket és levezetéseket láttam, amik mindössze bizonyos speciális értékeket határoztak meg a zömítő görbéből, ilyenek voltak a folyáshatár, a szerkezeti merevség, vagy a platófeszültség. Én egy olyan összefüggést szeretnék létrehozni, ami a teljes zömítő görbét leírja, így képes az elnyelt energia becslésére is. Továbbá külön kritériumként szabtam meg, hogy csak a felhasznált anyagok

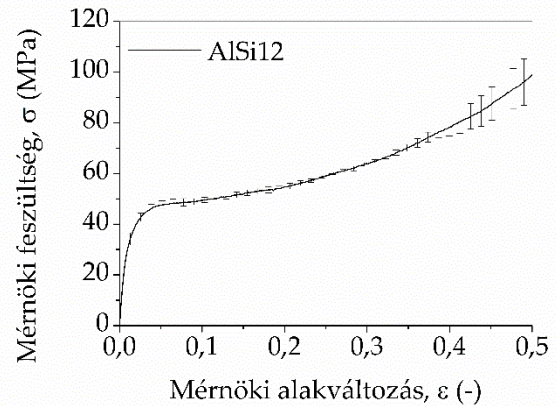
mechanikai tulajdonságai, illetve a hab szerkezeti jellemzői (pl.: pórus méret, térkitöltés) lehetnek a bemenő paraméterek. A kiindulási alapom a különböző alumínium ötvözetek folyásgörbéjét leíró egyenlet volt [33]:

$$k_f = C_1 + C_2 \cdot \varphi + C_3 \cdot e^{(C_4 \cdot \varphi)} \quad (4.3.)$$

Ahol: k_f – a folyáshoz szükséges feszültségérték, C_1, C_2, C_3, C_4 – konstansok, φ – pedig a logaritmikus alakváltozás. Ebben az egyenletben az exponenciális tag a rugalmas alakváltozás alatti szakaszt írja le, míg a lineáris tag a képlékeny szakaszt, ahol folyamatosan keményedik fel az anyag. Egy tipikus tömör anyag folyásgörbéjét ábrázolja az 4.3. ábra. A 4.4. ábra pedig egy vas gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhab zömítő görbéjét ábrázolja.



4.3. ábra Az AlSi12 anyag Watts-Ford kísérletből származtatott folyásgörbéje



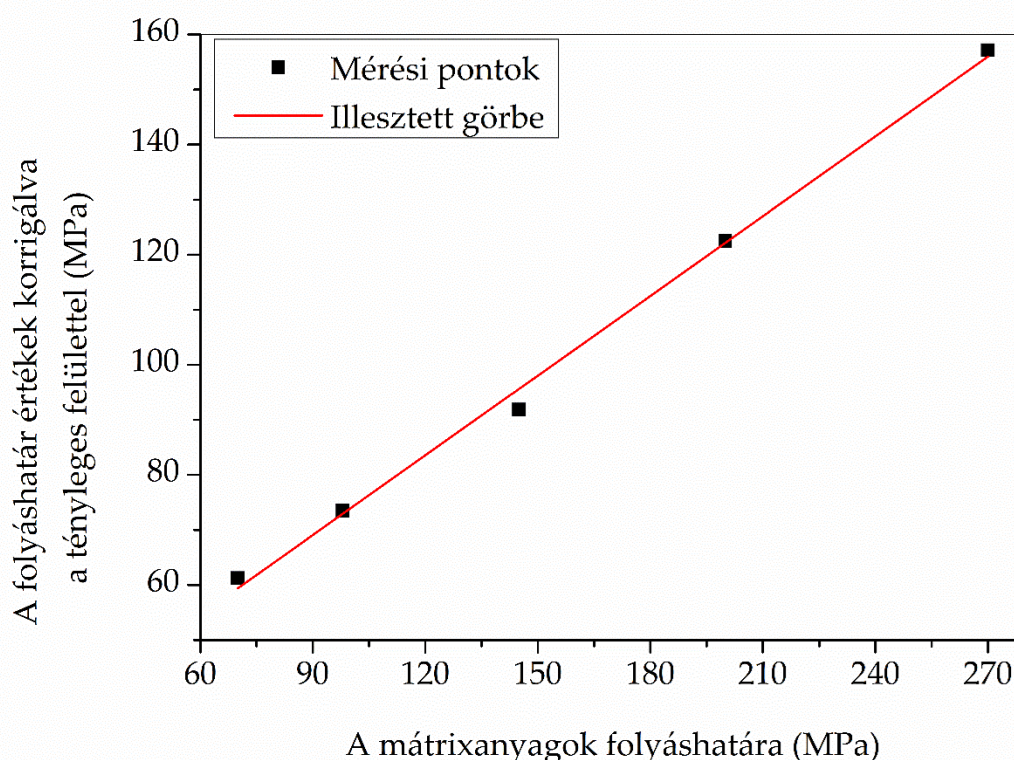
4.4. ábra Az AlSi12 mátrixanyagú fém gömbhéj erősítésű szintaktikus fémhab zömítő görbéje

A fémhab zömítő görbéjének az elejét szintén jól leírja egy exponenciális tag. A folyáshatár utáni szakaszra pedig egy harmadfokú görbe illik rá. Ezen alapfeltevésekből kiindulva alkottam meg a saját egyenletemet:

$$\sigma_{f, hab} = C_1 + C_2 \varepsilon + C_3 \varepsilon^3 - C_4 e^{(C_4 \varepsilon)} \quad (4.4.)$$

Ahol: σ_f – a folyáshoz szükséges feszültségérték, C_1, C_2, C_3, C_4 – konstansok, ε – a mérnöki alakváltozás. A konstansok meghatározása volt a következő lépés. Ehhez először azt kellett felfedeznem, hogy a szabványban meghatározott feszültség – alakváltozás görbe nem írja le helyesen a fémhabban ébredő feszültségeket. Ez azért van, mert a szabvány azt írja elő, hogy az erőt a teljes keresztmetszettel osszuk el. A valóságban azonban az üregekben természetesen nem ébredhet erő és feszültség, így jóval nagyobb feszültség ébred a fennmaradó felületen. Ennek a tényleges, dolgozó felületnek

a meghatározásához a már megalkotott 3D-s modellt használtam. Az elkészített modellt 20 egymással párhuzamos sík mentén elmetsttem és leolvastam a megjelenő felület nagyságát. Ezeket az értékeket átlagoltam és ebből megkaptam a valós felület becslését, amin ténylegesen megoszlik a terhelőerő. Amennyiben ezzel a felülettel osztottam el a mért erőértékeket, egy nagyobb feszültségértékekkel rendelkező diagramot kaptam. Az összes anyagra [1] elvégeztem ezt a módosítást, és újra meghatároztam a folyáshatárhoz tartozó feszültségértékeket. Ezeket az értékeket a mátrixanyag folyáshatárának függvényében ábrázolva lineáris összefüggést tapasztaltam. Ezt mutatja be az 4.5. ábra.



4.5. ábra A szintaktikus fémhabok folyáshatárának a tényleges felülettel korrigált értékei a mátrixanyagok folyáshatárának függvényében ábrázolva, illetve ezekre a pontokra illesztett görbével

Az egyenes egyenlete:

$$\sigma_{hab} = a + b \cdot \sigma_{mátrix} \quad (4.5.)$$

Ahol: σ_{hab} – a fémhab folyáshatára, a és b – konstansok, $\sigma_{mátrix}$ – a mátrixanyag folyáshatára. Az a tényező értéke (20,51 MPa) a gömbhéj folyáshatárából és szerkezeti tulajdonságaiból származtatható a következő módon:

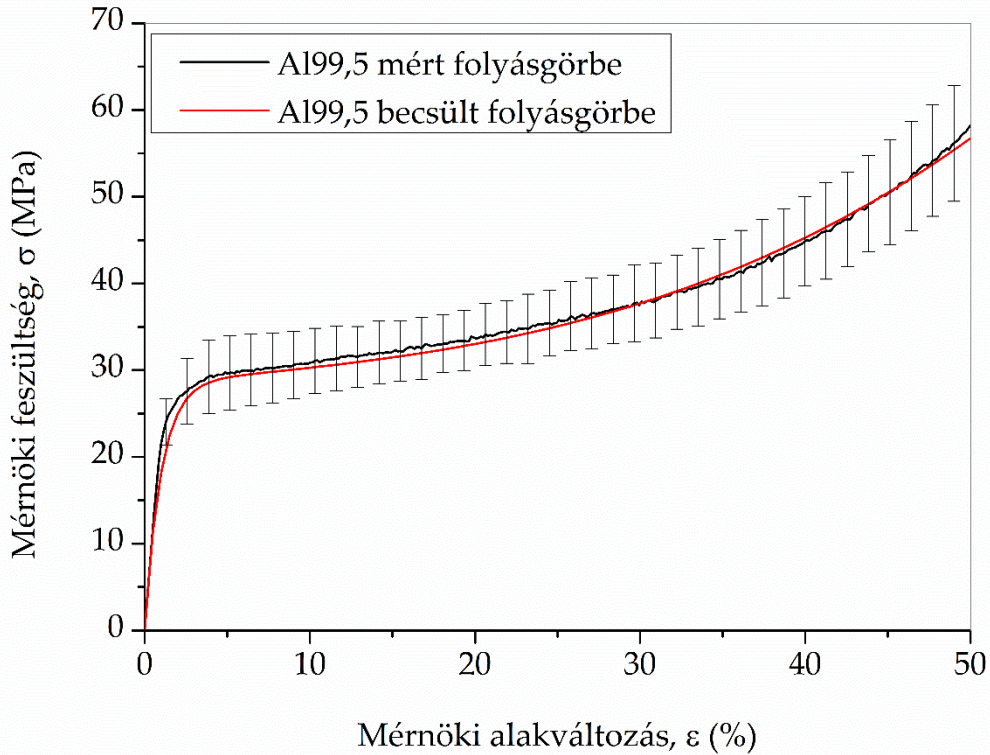
$$a = \sigma_{gömbhéj} \cdot (1 - p_{fal}) \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^3\right) \quad (4.6.)$$

Ahol: $\sigma_{gömbhéj} = 345$ MPa – a gömbhéj anyagának folyáshatára [34], $p_{fal} = 0,15 = 15\%$ – a gömbhéj falának porozitása (mikroszerkezeti felvételek feldolgozása nyomán), $r = 937$ μm – a gömbhéj belső sugara, $R = 960$ μm – a gömbhéj külső sugara.

A b tényező értéke 0,48, ez az érték pedig a tényleges felület és a 14 mm átmérőjű kör lap területének hányadosa. A mérési eredményekre illesztve az általam meghatározott összefüggést, azt tapasztaltam, hogy a következő módon írható fel az egyenlet:

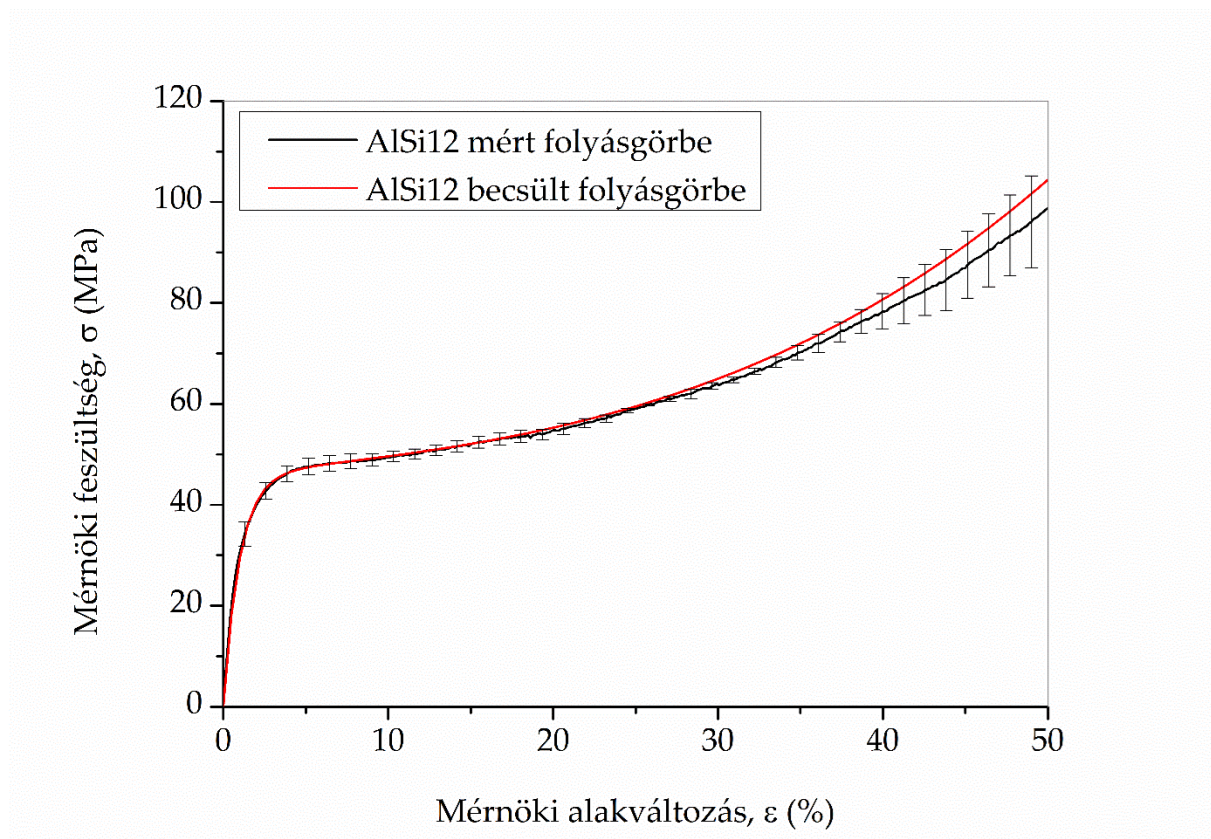
$$\sigma_{f,hab} = \sigma_{hab} + b\sigma_{mátrix}\varepsilon + 10b\sigma_{mátrix}\varepsilon^3 - \sigma_{hab}e^{(-100\varepsilon)} \quad (4.7.)$$

Itt már jól látszik, hogy ahhoz hogy a fémhab folyásgörbét megbecsüljük, mindössze a kiinduló anyagok tulajdonságait, illetve a térkitöltést kell ismernünk. Az 4.6. ábra egy becsült és egy mért görbét mutat be. A feszültség értékeket MPa-ban míg az alakváltozást százalékban kell behelyettesíteni.

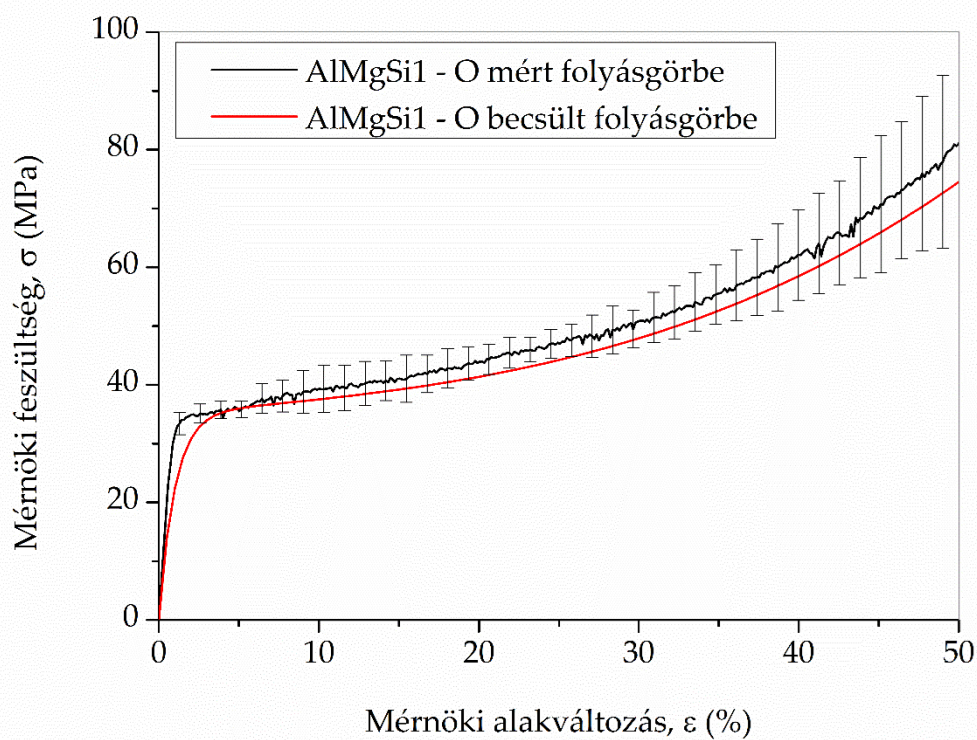


4.6. ábra Az Al99,5 mátrixanyagú szintaktikus fémhab mért, illetve becsült folyásgörbéje

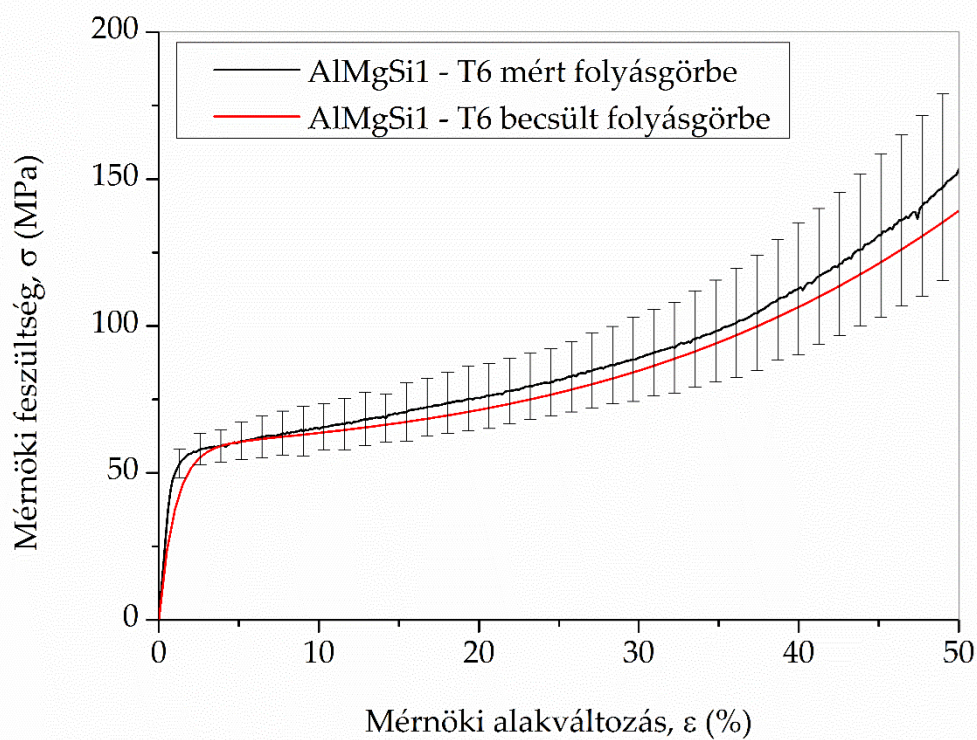
A rugalmas szakaszon az illesztés pontossága nem tökéletes, de ez a terület még kutatásra vár, hiszen ahogy a korábbi munkáimban látható volt [1, 29], a rugalmas szakasz meredeksége változott a magasság/átmérő viszony függvényében, de pont el-
lentétesen a várthoz képest. Kiemelem, hogy ilyen formájában az egyenlet a mérnöki feszültség értékeket adja, és nem azokat az értékeket, amiket a szabvány meghatároz, így ahhoz, hogy a szakirodalomban fellelhető többi görbével összevethessük meg kell szorozni a tényleges felület és a teljes felület hányadosával. Az így létrehozott görbéket és a hozzájuk tartozó mért görbéket az 4.7. ábrától az 4.11. ábráig mutatom be.



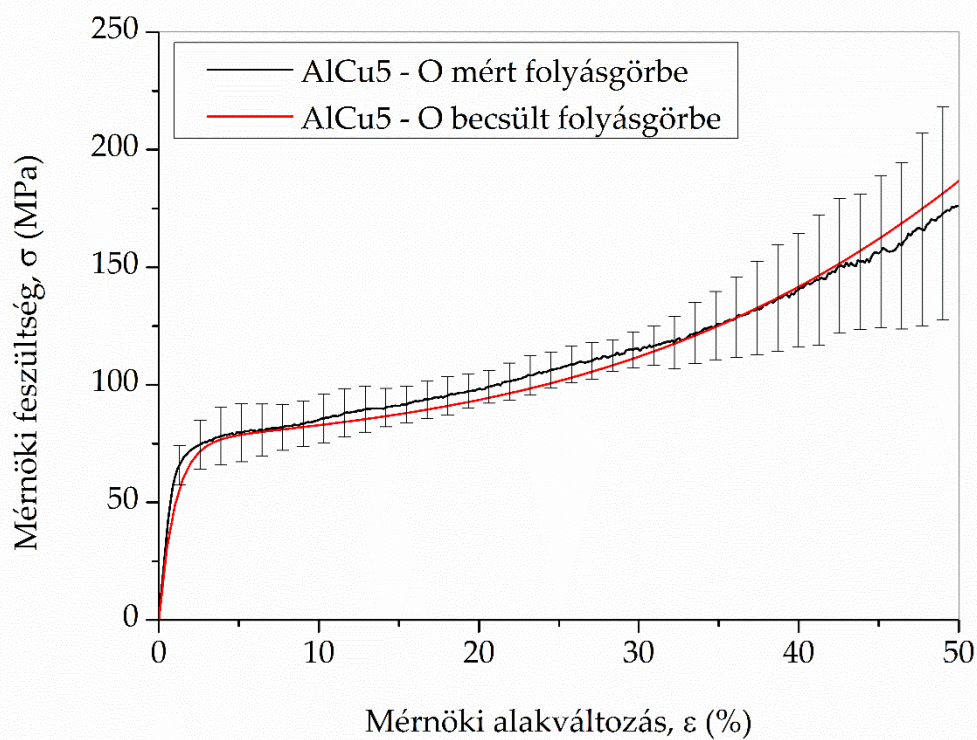
4.7. ábra Az AlSi12 mátrixanyagú szintaktikus fémhab mért, illetve becsült folyásgörbéje



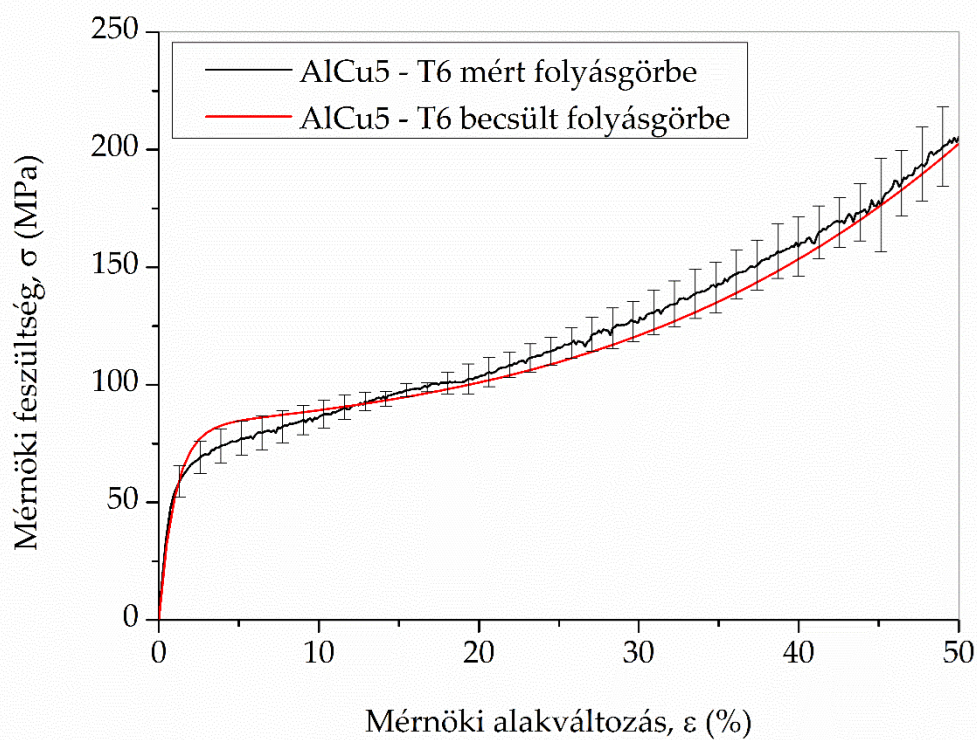
4.8. ábra Az AlMgSi1-O mátrixanyagú szintaktikus fémhab mért, illetve becsült folyásgörbéje



4.9. ábra Az AlMgSi1-T6 mátrixanyagú szintaktikus fémhab mért, illetve becsült folyásgörbéje



4.10. ábra Az AlCu5-O mátrixanyagú szintaktikus fémhab mért, illetve becsült folyásgörbéje



4.11. ábra Az AlCu5-T6 mátrixanyagú szintaktikus fémhab mért, illetve becsült folyásgörbéje

A görbékéből meghatároztam a szabványos mérőszámokat, ezek értékét, valamint a mért értékeket az 4.2. táblázatban foglaltam össze, ahol a szabványos mérőszámok jelölésének jelentése [1]:

- σ_Y (MPa) – az anyag folyáshatára, amely megfelel a tömör anyagoknál mért $R_{p0,2}$ egyezményes folyáshatárral
- σ_{pl} (MPa) – a platófeszültség, amely a 20 – 40% -os alakváltozás közötti feszültségértékek átlaga
- S (MPa) – a szerkezeti merevség, amely megfelel a tömör anyagoknál a rugalmassági modulusz értékének
- $W_{50\%}$ (MJ/m³) – 50%-os alakváltozásig elnyelt energia, ami a feszültség – alakváltozás görbe alatti terület

4.2. táblázat A szabványos mérőszámok mért és becsült értékei, illetve a becsült értékek százalékos hibái

Mátrixanyag		Al99,5	AlSi12	AlMgSi1-O	AlMgSi1-T6	AlCu5-O	AlCu5-T6
Mért	σ_Y (MPa)	26	35	38	51	66	66
Becsült		25	41	31	52	73	68
Eltérés	%	4	17	18	2	11	3
Mért	σ_{pl} (MPa)	37	58	63	83	116	111
Becsült		38	66	49	86	123	113
Eltérés	%	3	14	22	4	6	2
Mért	S (MPa)	2332	3648	3988	6597	7279	7073
Becsült		1818	3605	2237	4687	4857	6490
Eltérés	%	28	1	78	41	50	9
Mért	$W_{50\%}$ (MJ/m ³)	1867	3123	2492	4404	5563	6073
Becsült		1850	3189	2350	4164	5496	5940
Eltérés	%	1	2	6	6	1	2

A fenti eredmények függvényében kijelenthető, hogy az általam kidolgozott egyenlet jó közelítéssel leírja az ilyen típusú fémhabok folyásgörbéjét. A szakirodalomban található specifikus értékek helyett a teljes görbét leírja. Ez azért is kiemelkedően fontos, mivel így a görbe alatti terület, tehát az elnyelt energia is könnyen meghatározható, ami a szintaktikus fémhabok egyik legfontosabb tulajdonsága. Szembetűnő hogy

némelyik érték – főleg a szerkezeti merevség – becslése nem tökéletes, ellenben az 50%-ig elnyelt energia értékek nagyon jó közelítést adtak. Ez a táblázat nem tartalmazza a szórást, de a diagramokon látni lehetett, hogy minden görbe a mért értékek szórási sávján belül fut, ami szintén alátámasztja az összefüggés helyességét.

5. A SZERKEZETI MEREVSÉG BECSLÉSE

Ahogy az előző fejezetben láthattuk, a szerkezeti merevség sok tekintetben a várható trendtől eltérő értékeket vett fel. Ennek a problémának a megoldására külön hangsúlyt fektettem, és többféle módszerrel is megvizsgáltam a fémhabok ezen tulajdonságát. Mivel ez nem csak az általam gyártott fémhaboknál jelentős probléma, ebben a fejezetben kiterjesztettem a vizsgálati anyagokat a kerámia gömbhéjakkal erősített fémhabokra is. A jelölésrendszer megegyezik az általam használttal, tehát először a mátrix anyag neve, majd kötőjellel az erősítőanyag megnevezése. Például az AlSi12-SSI azt jelenti, hogy egy AlSi12 mátrixanyagú, SSI jelű kerámia gömbhéjjal erősített fémhabról van szó.

5.1. A szerkezeti merevség mérése zömítő vizsgálattal

Az eddigi mérések során az MTS 810 típusú hidraulikus, univerzális anyagvizsgáló gépet használtam. A mért elmozdulásokat a keresztfej elmozdulásából, míg az erőértékeket egy 250 kN-os erőmérő cellából kaptam [1]. Az 5.1. ábra mutatja be az erőmérő cellát, míg az 5.2. ábra a használt szerszámot.



5.1. ábra Az MTS 810 típusú hidraulikus, univerzális anyagvizsgáló 250 kN-os erőmérő cellája



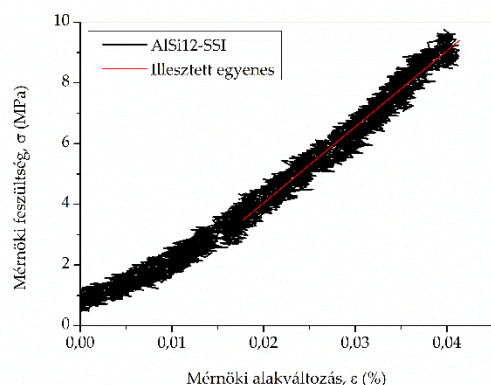
5.2. ábra A zömítő vizsgálatokhoz használt kétoszlopos zömítő szerszám

Ez egy kétoszlopos zömítő szerszám, és mint ilyen mindenképpen fellép súrlódás. Ez szintén vezethet pontatlanságokhoz kis elmozdulások esetén. Ahhoz, hogy ennél pontosabb képet kaphassak arról, hogy mi történik a kezdeti szakaszban a fémhabokkal, ennél jóval pontosabb mérésre van szükség. Az erőmérő cella mérési pontosságáról nem találtam semmilyen adatot a leírásában, de ha feltételezzük, hogy egy jó pontosságú műszerről van szó, akkor a mérési maximum $1/500$ -a alatt a pontatlansága megnő, tehát 500 N alatt pontatlan. Ez az érték kicsinek tűnhet, de ahhoz hogy a szerkezeti merevséget meghatározhassuk, maximum pár ezer N-ig terheljük a darabot, hogy elkerüljük a képlékeny alakváltozást a mátrixanyagban. Megjegyzendő, hogy a képlékeny alakváltozás szinte kikerülhetetlen, ahogy azt Kádár és társai [12] bizonyították akusztikus emissziós vizsgálat segítségével. A pontosság növelése érdekében tehát egy kisebb erőmérő cellán végeztem el a mérést, ami egy Instron 5965 típusú elektromechanikus anyagvizsgáló gépre volt felszerelve. A méréshez egy Instron 2580-108 típusú 5 kN méréshatárú erőmérő cellát alkalmaztam.

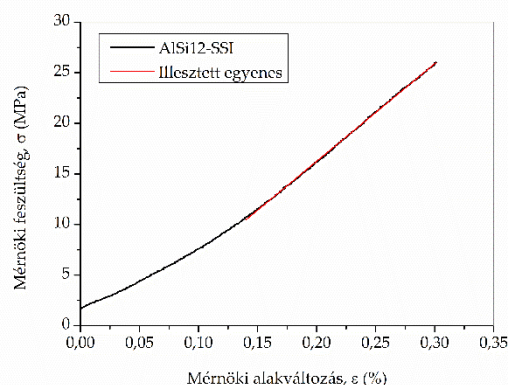
A keresztfej elmozdulása helyett egy MTS 632.11C-20 jelű finomnyúlásmérő műszerrel rögzítettem az elmozdulás értékeket. Ezt azzal indokoltam, hogy a mérésekből megmutatkozott, hogy kis elmozdulásoknál a keresztfej elmozdulásának pontatlansága okozza a legnagyobb mértékű hibát, nem az erőmérő celláé.

Az így összeállított elrendezéssel többféle mérést végeztem. Itt még a kétoszlopos szerszámot alkalmaztam. Az ebből kapott tipikus görbét mutatja be az 5.3. ábra. Először csak 1500 N -ig terheltem a próbatesteket. Azonban ebben a szakaszban még nagy a beállási pontatlanság, ami a felületi egyenlőtlenségekből adódik. Ehhez képest, amikor 4000 N -ig terheltem már egy jól definiálható szerkezeti merevség jelent meg, amire lehetett egyenest illeszteni. Ezen kívül kiküszöböltem a szerszámok oszlopai miatt fellépő súrlódást, úgy hogy két síklap között végeztem a zömítő vizsgálatokat.

Ahhoz hogy meg lehessen határozni a szerkezeti merevség értékeit ezekből az erőelmozdulás görbékből, át kellett alakítani őket, feszültség-alakváltozás görbékké. Ehhez az erő értékeket a próbatest keresztmetszetével osztottam, míg az elmozdulás értékeket, a próbatest kiinduló magasságával. Az ebből kapott mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás görbéket újra ábrázoltam, erre látható egy példa az 5.4. ábra. Ennek a görbének a lineáris szakaszára illesztettem egy egyenest, ahogy az az 5.4. ábrán látszik. Ennek az egyenesnek a meredeksége a keresett szerkezeti merevség érték.



5.3. ábra Az AlSi12-SSI H/D=2 próbatest 1500 N-ig végzett zömítése kétszlopos szerszámban

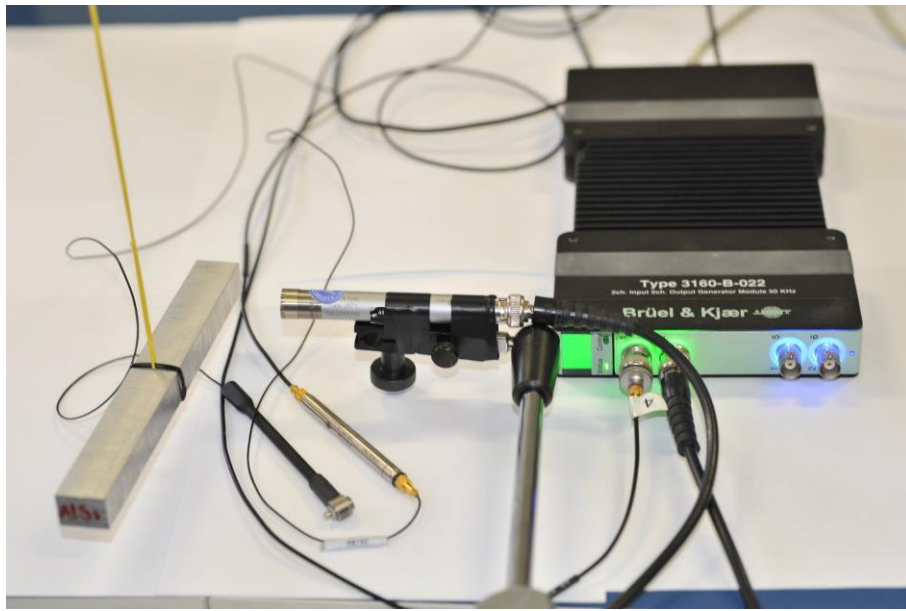


5.4. ábra Az AlSi12-SSI H/D=2 próbatest 4000N-ig végzett zömítése vezetőoszlopok nélkül

Az eredmények között az is a különbség hogy a végleges összeállításban az adatvételezési időt megfizettük, tehát fele annyi pontot kaptunk, de ez se magyarázza azt a nagy különbséget az oszlopos szerszámban végzett mérés zajosságára, ami megfigyelhető. Ez minden bizonnyal a vezetőoszlopok elhagyásából következő „stick-slip” hatás megszűnésének köszönhető. Mindenezek figyelembevételével kijelenthető, hogy az új mérési összeállítás alkalmas a szerkezeti merevség kimérésére.

5.2. A szerkezeti merevség meghatározása modális analízissel

A sajátfrekvencia méréséhez szükség volt egy olyan kalapácsra (modális kalapács, Brüel & Kjaer type 8203), amivel mérni lehet mekkora erővel ütöttük meg a tárgyat (vagyis rögzíteni lehet a gerjesztést). Szükség volt egy érzékeny mikrofonra (Brüel & Kjaer type 4189), amellyel rögzíthető volt a próbatest rezgése, mint a gerjesztésre adott válasz. Szükség volt továbbá egy alkalmas adatgyűjtőre (Brüel & Kjaer type 3050-B-060) és nem utolsósorban egy olyan szoftverre, amivel a kalapácsból, és a mikrofonból érkező jeleket időben összehangoltan lehet rögzíteni és alkalmas az átviteli függvény kiértékelésére és így a modális paraméterek meghatározására. Az 5.5. ábra mutatja be a mérési elrendezést.



5.5. ábra A sajátfrekvencia mérésének összeállítása

Ahhoz, hogy a Timoshenko rúdelmélettel kiértékelhessük a kapott jeleket, a próbatestet fel kellett lógatni, mivel ez az elmélet csak a mindkét végén szabad rúdra érvényes. Ezt egy gyorskötözővel és 5 egymáshoz kötött gumival oldottam meg. Azért volt szükség ilyen sok gumira, mivel a rezgésnek lesz egy olyan komponense, ami a gumik lengéséből adódik, és minél hosszabb egy gumiszalag annál alacsonyabb frekvenciák felé fog tolódni ez az érték, így könnyű lesz kiszűrni a kapott jelek közül. A képen balról jobbra haladva láthatjuk a próbatestet, ami egy $170 \times 25 \times 15$ mm nagyságú tömb volt, mellette látható a kalapács, valamint a hozzá tartozó jelerősítő. Ezt követi a mikrofon és az adatfeldolgozó egység, amiből a jelek egy számítógépbe futottak.

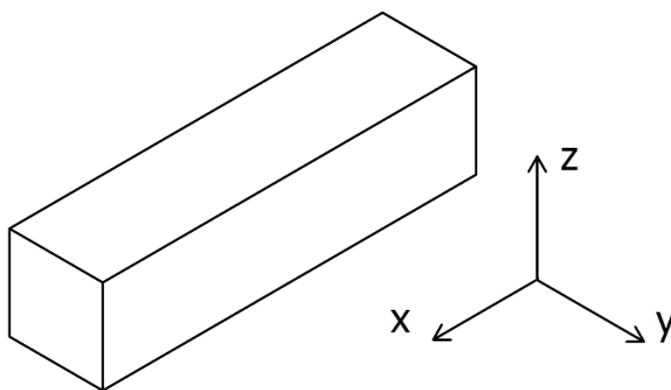
Az adatok kiértékeléséhez a Timoshenko rúdelméletet alkalmaztam, melynek az egyenletét az 5.1. egyenlet mutatja be.

$$z(x)^{IV} + \omega^2 \rho \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{\kappa G} \right) z(x)'' + \left(\omega^4 \frac{\rho^2}{\kappa G E} - \omega^2 \frac{\rho A}{I E} \right) z(x) = 0 \quad (5.1.)$$

Ez egy negyedrendű közönséges differenciálegyenlet, melyben a $z(x)$ a rúd z irányú elmozdulása, A a rúd keresztmetszetének területe, ρ a rúd anyagának sűrűsége, I a másodrendű nyomaték, E a rugalmassági modulusz, κ a Timoshenko féle nyírási együttható, ω a sajátfrekvencia, a G pedig a csúsztató rugalmassági modulusz. Az ismert paramétereket behelyettesítve esetünkben megkapjuk az effektív rugalmassági modulusz értéket.

5.3. Modális analízis végeselemes szimulációja

Ennek a szimulációnak a célja az, hogy az előző fejezetben elvégzett mérést megismételjem végeselemes szimuláció segítségével, és az ebből kapott értékeket összevegyem a mért értékekkel. Ehhez először egy rúd alakú modellt kellett létrehoznom fémhából, ami jóval nagyobb, mint az eddig modellezett és ismertetett zömítő próbatest. Erre azért volt szükség, mert a kisebb modellek esetén az y és z irányú (5.6. ábra) lengésképekhez tartozó sajátfrekvenciák között nagy eltérés tapasztalható, ami a fémháb inhomogenitásából fakad. Minél nagyobb a modell, annál kisebb lesz az eltérés a két érték között, de sose lesz nulla, mivel a gömbök elhelyezkedése véletlenszerű.



5.6. ábra A modális analízishez készített modell vázlata és a hozzá tartozó koordinátarendszer

A végeselemes modell megalkotásánál a 3.1 és a 3.3 fejezetben bemutatott lépéseket hajtottam végre. Ebben az esetben viszont modális analízist végeztem, úgy hogy a gömbhéjak nem voltak benne a mátrixanyagban. Azért volt szükség egy ilyen egyszerűsítésre, mivel a modális analízis során külön testként kellett volna definiálni mind a közel 6500 gömbhéjat. Ennyi testet pedig nem tud külön kezelni a program, mivel mindegyiknek külön kontaktot kellett volna beállítani. Megoldás lehetett volna, hogy ugyanúgy egy testként kezeljem a gömbhéjakat, mint a zömítésnél, azonban ezt nem lehet megtenni ebben a modulban, mivel nem érnek össze a gömbhéjak, így a Marc Mentat kilépett számításból.

Bemenő adatként meg kellett adni a mátrixanyag sűrűségét illetve rugalmassági modulusát. Eredményként pedig sajátfrekvenciákat, és lengésképeket fogunk kapni, akár csak a mérésnél. A végeselemes számítást úgy állítottam be, hogy az első két sajátfrekvenciát számítsa ki. Azért döntöttem amellett, mert a mérésből is ezeket az értékeket kaptuk meg. Mivel a modellben tisztán rugalmas anyagmodellel dolgoztam, ezért a kapott szerkezeti merevség érték meg fog egyezni az effektív rugalmassági modulus értékével.

5.4. A szerkezeti merevség meghatározása végelelemes modellezéssel

Első lépésben a kutatás ezen része csak egy próbálkozás volt, annak felderítésére, hogy ha a mátrixanyagnak tisztán rugalmas tulajdonságokat adok meg, akkor milyen eredményt kapok a zömítő vizsgálatából. Ehhez a modális analízishez létrehozott mintát kezdtem el zömíteni két merev test között. Az eredmény szinte tökéletesen megegyezett a modális analízisből kapott szerkezeti merevség értékkel (ami egyben az effektív rugalmassági modulusz érték is). Az eltérés az előző fejezetben vázolt inhomogenitásokból fakadhat. Ezen felbuzdulva elkezdtem kisebb mintákat, más és más térkitöltésekkel modellezni. Ez viszonylag egyszerű volt, mivel a kiosztó programban könnyen tudtam módosítani a gömbhéjak közötti távolság értékeit. Így közel egyenletes elosztásban voltak a gömbök a mátrixanyagban, ami nagyban segíti a minták homogenitását.

Mivel nem közvetlenül a térkitöltést állítom, ezért csak közelítőleg tudtam beállítani, hogy 10%-onként növeljem a térkitöltést. Az 5.7. ábra és az 5.8. ábra mutatja be a 10%-os térkitöltéshez, és a 35% -os térkitöltéshez tartozó 3D CREO modellt.



5.7. ábra 10 térfogat százaléknyi gömbhéjat tartalmazó fémhab 3D modellje



5.8. ábra 35 térfogat százaléknyi gömbhéjat tartalmazó fémhab 3D modellje

5.5. Szerkezeti merevség meghatározása analitikus módszerekkel

Az analitikus módszerek közül hárommal foglalkoztam részletesebben, mivel ezek álltak egymáshoz a legközelebb, ahogy az Bardella és társai cikkében látszik [28]. A felhasznált egyenleteket a 2.7 fejezetben írtam le. A cikkben a térkitöltés függvényében voltak ábrázolva a szilárdsági értékek, így én is ezt vettem alapul. Ahhoz, hogy egy ilyen görbét ábrázolni tudjak, meg kellett oldanom az egyenletrendszereket. Ha egy adott térkitöltéshez keresünk megoldást, azt könnyen meg is találhatjuk, és így a Mori-Tanaka becsléshez valamint a klasszikus önkonzisztens becsléshez elegendő volt egy Maple programot írnom, ami lefuttatta a számolást, százados térkitöltés felbontással, és az eredményeket egy-egy szövegfájlba írta ki. Így eredményként megkaptam az effektív rugalmassági modulusz értékeket a térkitöltés függvényében.

A differenciális önkonzisztens becslés azonban már nehezebb feladat volt, mert egy differenciálegyenletet kellett megoldani minden egyes térkitöltéshez. Ahhoz, hogy ez gyorsan és pontosan menjen, egy Matlab programot írtam, ami szintén százados felbontással haladt a térkitöltésben, és oldotta meg minden esetben a differenciálegyenletet az explicit Euler módszer segítségével. A kiinduló adatok a tömör mátrixanyagra vonatkoztak, ami megfelel a valóságnak, hiszen ha a gömbhéjak térkitöltése nulla, akkor a mátrixanyag rugalmassági moduluszát kell kapnunk eredményként.

6. A SZERKEZETI MEREVSÉG MÉRÉSÉNEK, VÉGESELEMES SZIMULÁCIÓJÁNAK ÉS AZ ANALITIKUS SZÁMÍTÁSOKNAK AZ EREDMÉNYEI

Ebben a fejezetben az előző fejezetben bemutatott, a szerkezeti merevség meghatározását célzó ötféle módszer eredményeit mutatom be. A zömítő vizsgálatok során megmértem az AlSi12 mátrixanyagú mintákból az SSI, SLG, Globocer és vas gömbhéjakkal (Globomet) erősített mintákat. Az Al99,5 mátrixanyagú fémhabokból, pedig az SSI és az SLG gömbhéjakkal erősített mintákat mértem meg. A Globocer gömbhéjjal erősített fémhabból csak H/D=1-es minta, míg a vas gömbhéjjal erősített fémhabból csak H/D=2-es minta állt a rendelkezésemre. A mérésekből kapott eredményeket a 6.1. táblázat foglalja össze.

6.1. táblázat A zömítő mérésből kapott szerkezeti merevség értékek

Szerkezeti merevség (GPa)						
	Al-SLG	Al-SSI	AlSi-SLG	AlSi-SSI	AlSi-Globocer	AlSi-Vas g.h.
H/D=1	0,88	1,13	1,16	1,21	1,36	-
H/D=1,5	1,62	1,88	2,12	1,96	-	-
H/D=2	1,91	2,10	2,43	2,49	-	1,80

A kapott értékeknél továbbra is fenn áll az a furcsa jelenség, amit már a TDK dolgozatom [1] során is kiemeltem, hogy a szerkezeti merevség értékek növekedtek a magasság átmérő viszony növelésével. Ahogy az értékekből látszik ez a jelenség nem tudható be a mérési pontatlanságoknak, annál jóval jelentősebb, valamint a mérési összeállításban sikerült minimalizálni a mérésből származó hibákat. Ezekből az okokból kifolyólag arra lehet következtetni, hogy zömítéssel nem lehet pontosan megmérni az effektív rugalmassági modulusz értékeket, mivel nem viselkedik lineárisan rugalmasan a próbadarabunk, tehát csak a szerkezeti merevség határozható meg. Ennek a kérdésnek a vizsgálata meghaladja ennek a dolgozatnak az időkeretét, így ezzel a jövőben érdemes lenne foglalkozni.

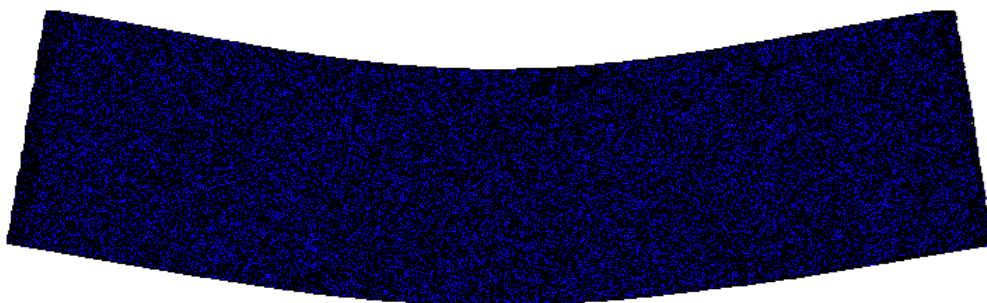
A sajátfrekvencia mérésből kapott jeleket a mérés során használt programmal értékeltem ki, majd ezekből a kiértékelt jelekből megkaptam az első és a második sajátfrekvencia értékeket. Ezeket már fel tudtam használni a Timoshenko rúdelméletben, melyhez rendelkezésemre állt egy Mathematica környezetben írt program. Itt csak Globocer gömbhéjakkal erősített fémhabokat volt lehetőségem vizsgálni, mivel ezekből állt rendelkezésre megfelelő méretű anyag, amiből a kellően nagy (170×25×15 mm) próbatesteket ki lehetett munkálni. Egy referencia mérést is végeztem egy tömör alumínium tömbön. A mérésekből meghatározott rugalmassági modulusz, illetve effektív rugalmassági modulusz értékeket a 6.2. táblázat foglalja össze.

6.2. táblázat A sajátfrekvencia mérésből visszaszámolt rugalmassági modulusz és effektív rugalmassági modulusz értékek

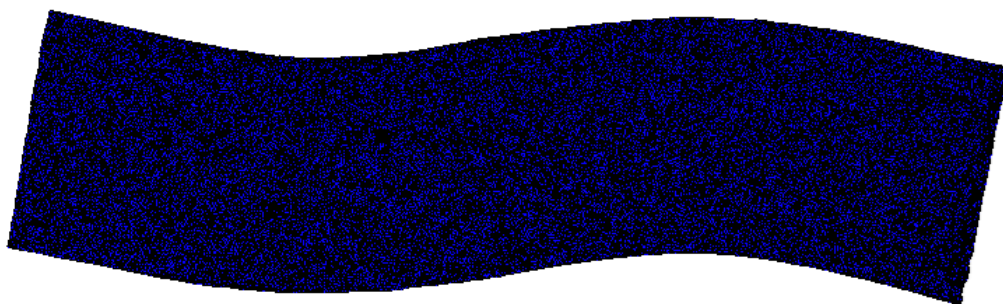
	Rugalmassági modulusz (GPa)		Effektív rugalmassági modulusz (GPa)	
	Tömör Al	Tömör AlSi	Al-Globocer	AlSi-Globocer
1. próbatest	72,29	77,86	22,54	25,72
2. próbatest	69,81	79,06	23,86	25,11

Az eredményekből látszik, hogy a mátrixanyagnak jelentős hatása van, ahogy azt várni lehetett. Illetve az is megfigyelhető, hogy a referencia mérés szinte tökéletesen visszaadta a szakirodalomban fellelhető értéket a rugalmassági moduluszra [35], ami alátámasztja a mérés helyességét. A próbatestek közötti szórás értékek a tömör alapanyagnál nagyobbak mutatkoztak, mint a fémhabnál, így megállapítható, hogy a mérés jó közelítést ad az effektív rugalmassági moduluszra.

A végelelemes szimulációval végzett modális analízis során megkaptam az első két sajátfrekvenciát, de nem csak a hajlítókát, ahogy azt a mérés során, hanem a csavarókat is. A szimuláció nagy előnye, hogy nem csak sajátfrekvencia értékeket ad eredményül, hanem vizualizálni is lehet a lengésképeket. Az első és a második sajátfrekvenciához tartozó lengésképeket mutatják a következő ábrák (6.1. ábra és 6.2. ábra).



6.1. ábra A végelelemes szimulációból kapott lengéskép az első sajátfrekvenciánál



6.2. ábra A végelelemes szimulációból kapott lengéskép a második sajátfrekvenciánál

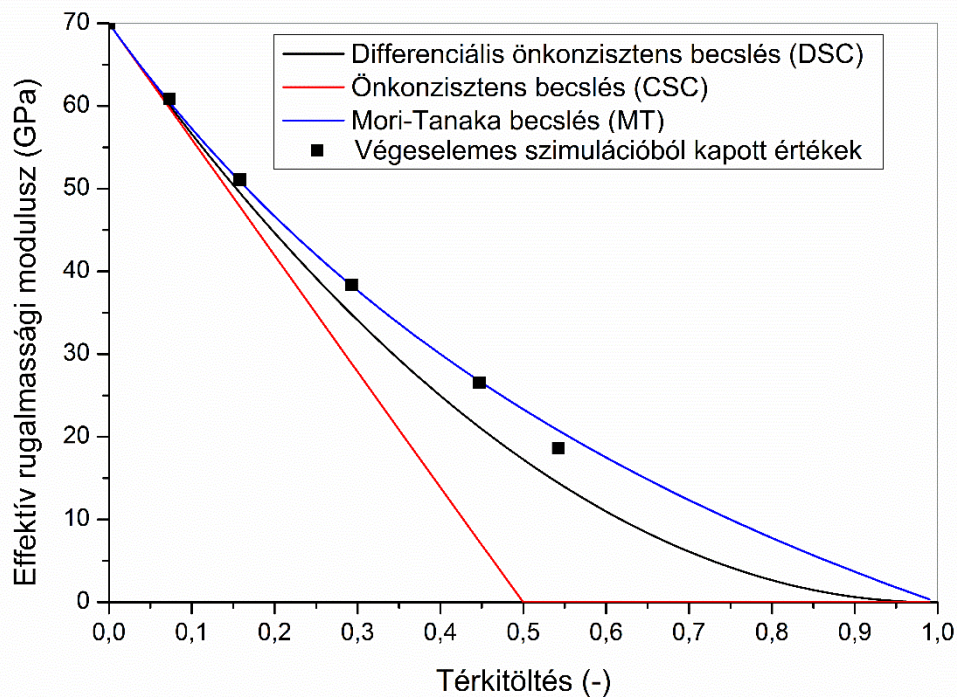
Az ábrákon azért nem vehetők ki egyenként az elemek, mivel közel 3 millió tetraéder elem található a modellben. Az első ábrán egy fél szinusz hullám alak látható, míg a másodikon egy teljes szinusz hullám. Ezt az eredményt vártuk is, mivel a tömör, mindkét végén szabad rudaknál is ezek az alakok figyelhetők meg. Ezen kívül kitérnék a megfigyelt hibára is, ami a hab inhomogenitásából akad, ahogy azt az 5.3. fejezetben taglaltam. A jelölések megegyeznek az ott bemutatottakkal (5.6. ábra), tehát az y és z irányban mérhető sajátfrekvencia értékek az első sajátfrekvenciánál f_{1y} és f_{1z} , míg a második sajátfrekvenciánál f_{2y} és f_{2z} volt. Megvizsgáltam, hogy ez az inhomogenitás mekkora effektív rugalmassági modulusz értékbeli változást okoz, ezért kiszámoltam, hogy milyen eredményre jutok, ha az egyenletekbe az f_{1y} , f_{2y} és f_{1z} , f_{2z} párosokat helyettesítem be. Ezt mind a két mátrixanyagra megtettem úgy, hogy a mátrixanyag rugalmassági moduluszát a tiszta alumínium esetén $E = 70$ GPa -nak, míg az AlSi12 esetén $E = 78$ GPa -nak vettem [35]. Az eredményeket a 6.3. táblázat foglalja össze.

6.3. táblázat A végeleemes szimulációból kapott sajátfrekvencia értékek, és a belőlük számított effektív rugalmassági moduluszok

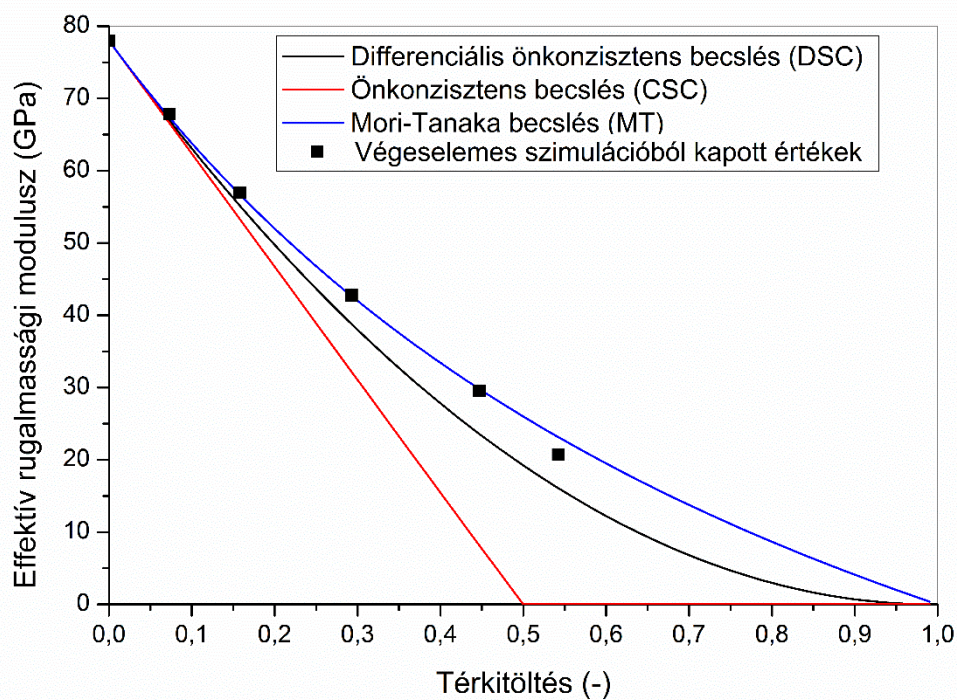
Al99,5			AlSi12		
f_{1y} (Hz)	f_{2y} (Hz)	E (GPa)	f_{1y} (Hz)	f_{2y} (Hz)	E (GPa)
14564	31891	22,82	15590	34761	25,60
f_{1z} (Hz)	f_{2z} (Hz)	E (GPa)	f_{1z} (Hz)	f_{2z} (Hz)	E (GPa)
14783	33207	22,81	15632	34911	25,68

Az inhomogenitásból adódó eltérés nincs nagy hatással az eredményekre, ahogy látható, így ezzel a módszerrel is sikerült igazolni, hogy a mérés helyes eredményt adott. Ehhez járul hozzá az is, hogy a mért és a szimulációból kapott értékek közel azonosak.

Ahogy azt kifejtettem az 5.4. fejezetben, a zömítő vizsgálatot is modelleztem végeleemes szimulációval. A 3. fejezethez képest az volt az eltérés, hogy itt tisztán rugalmas anyagot állítottam be. Ezeknek a szimulációknak az eredményeit az elméletből kapott görbékkel együtt mutatja be a 6.3 és a 6.4. ábra.



6.3. ábra Az analitikus modellekből kapott görbék, valamint a végeselemes szimulációból kapott értékek ábrázolása az effektív rugalmassági modulusz – térkitöltés diagramban, az Al99,5 mátrixra vonatkozóan



6.4. ábra Az analitikus modellekből kapott görbék, valamint a végeselemes szimulációból kapott értékek ábrázolása az effektív rugalmassági modulusz – térkitöltés diagramban, az AlSi12 mátrixra vonatkozóan

Ezek az eredmények jól illeszkednek a Mori-Tanaka féle becslésre, ahogy az az ábrákban is látszik. Ahhoz, hogy ezekre a diagramokra rá tudjam illeszteni a sajátfrekvenciás mérés eredményeit is, szükségem van a valós próbatestek térkitöltésére. Ehhez azt használtam ki, hogy a fémhab sűrűségének ki kell adódnia a komponensek sűrűségéből. A mátrixanyag sűrűsége ismert az irodalomból: $\rho_m = 2,7 \text{ g/cm}^3$ [35], míg a gömbhéjak sűrűségét Balázs Ágoston meghatározta a dolgozatában [36], ami $\rho_g = 0,852 \text{ g/cm}^3$ -nek adódott. A fémhab sűrűségét szintén meghatározta, így ezt se kellett elvégezni: $\rho_h = 1,833 \text{ g/cm}^3$. Ezekből az adatokból már meghatározható a térkitöltés az alábbi összefüggés szerint:

$$\rho_h = \rho_g \cdot x + \rho_m \cdot (1 - x) \quad (6.1.)$$

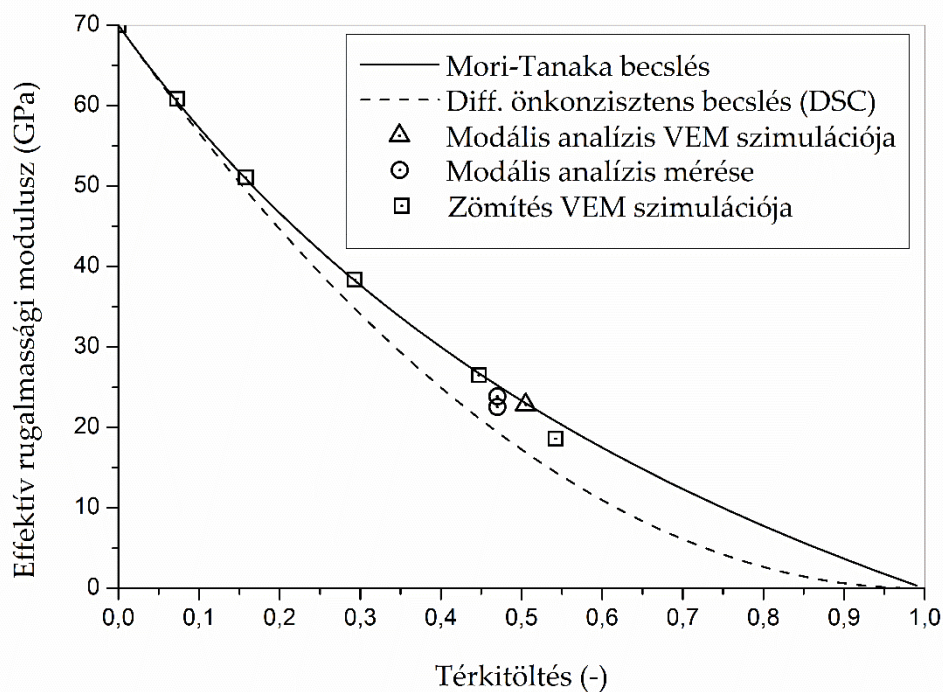
Ahol, x a térkitöltést jelöli, melynek értéke $x = 0,47$ -re adódott, tehát a térkitöltés 47%-os volt. Ez nagyban eltér az elméletileg elérhető 64 %-tól, azonban közel ugyanez a térkitöltés adódott a végeselemes modelljeim során is (50,5% lett a végeselemes modell), tehát összehasonlíthatóvá váltak az értékek ilyen tekintetben is. Ez a több mint 15%-os eltérés első ránézésre nagyon soknak tűnik, azonban a gömbhéj lerakó programnak köszönhetően bizonyítottam, hogy ez azt jelenti mindössze, hogy a gömbök között körülbelül 10-70 μm -es távolság alakul ki. Ez nagyon kis távolság, és könnyen előidézhetheti a gyártás során alkalmazott nyomás, illetve akár az is, hogy a gyártás elején nem sikerült a gömbhéjakat megfelelő mértékben összerázni.

Most már minden mért és számolt adatot egy táblázatban tudok összesíteni, azonban a zömítővizsgálat eredményeit kihagytam erről az összesítő táblázatból, mivel ott valószínűleg nem tisztán rugalmas alakváltozás játszódik le, így nincs értelme együtt ábrázolni ezekkel az értékekkel, mivel az ott kapott értékek szerkezeti merevség értékek, míg a többi megközelítésből az effektív rugalmassági modulusz értékét kaptam meg. Az elméletek közül pedig az önkonzisztens becslést kihagyom.

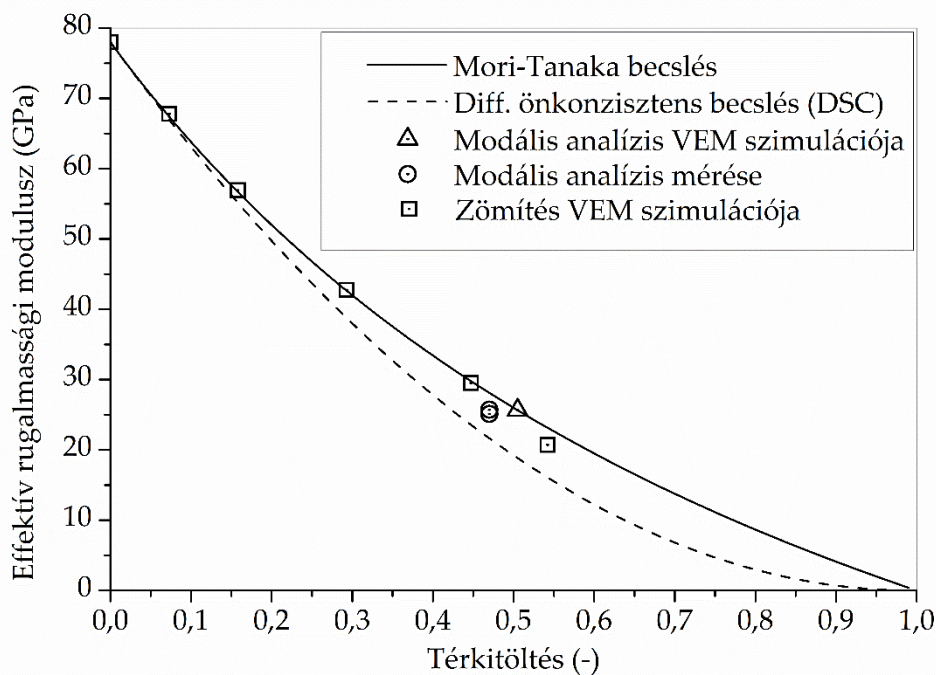
6.4. táblázat A mérésből, szimulációból valamint végeselemes modellezésből kapott effektív rugalmassági modulusz értékek adott térkitöltésnél

Effektív rugalmassági modulusz (GPa) (Térkitöltés)		
	Al99,5	AlSi12
Mori-Tanaka becslés	23,3 (0,50)	26,0 (0,50)
Diff. önkonzisztens becslés	17,2 (0,50)	19,2 (0,50)
Modális analízis VEM szimulációja	22,7 (0,50)	25,6 (0,50)
Modális analízis mérése	23,2 (0,47)	25,3 (0,47)
Zömítés VEM szimulációja	21,2 (0,50)	23,6 (0,50)

A mérésből, a végelelemes szimulációból, valamint az analitikus modellekből kapott effektív rugalmassági modulusz értékeket ábrázoltam a térkitöltés függvényében mátrixanyagoként. (6.5. ábra és 6.6. ábra).



6.5. ábra A mérési, szimulációs és analitikus eredmények az effektív rugalmassági moduluszra vonatkozóan a térkitöltés függvényében, Al99,5 mátrixanyagnál.



6.6. ábra A mérési, szimulációs és analitikus eredmények az effektív rugalmassági moduluszra vonatkozóan a térkitöltés függvényében, AlSi12 mátrixanyagnál.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen dolgozatomban először a fémhabok zömítő görbéjével foglalkoztam, ahol megalkottam egy saját zömítőgörbe-egyenletet a mérésekre alapozva, melyben a paraméterek a kiindulási anyagok tulajdonságaitól és a térkitöltéstől függenek.

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

Ez a leírásmód nem csak azért jó, mert a teljes folyásgörbére ad becslést, hanem azért is, mert az eddig még ki nem próbált anyagpárosításokról is adhat becslő értéket, amennyiben ismerjük a mátrixanyag és a gömbhéj mechanikai tulajdonságait. Ezáltal a tervezés folyamatát nagymértékben meg lehet gyorsítani.

Amennyiben a tervezés során végeselemes szimulációra kerül sor, szintén nagy lépést jelent ennek a modellnek az alkalmazása, hiszen nem szükséges a habokban az üregeket egyesével bevenni.

A gömbök véletlenszerű elhelyezésére külön programot írtam C++-ban és Matlabban, melyekben a gömbhéjak közötti távolságot szabályozni lehetett annak érdekében, hogy a hálózás során ne alakuljanak ki szinguláris pontok. Mindezen problémák kiküszöbölhetőek, ha tömör modellként tudjuk szimulálni a darabunkat, csak az anyagmodellnek az általam létrehozott egyenletet kell beadni, ezáltal sokkal egyszerűbbé és gyorsabbá válik a modellezés és a szimuláció.

Egy fontos kérdés azonban tisztázatlan maradt még ebben az esetben is. A szerkezeti merevség értékek abnormális viselkedésére megoldást kellett találni. Ennek érdekében többféle módszerrel is megvizsgáltam ezt a szakaszt. A sajátfrekvenciás mérés során nagyon kismértékű feszültség ébred az anyagban, így teljes mértékben elkerülhető a képlékeny alakváltozás. A mérési értékek összehasonlíthatóvá váltak az analitikus módszerekkel, ahol tisztán rugalmas viselkedést tételezünk fel.

A mérések, analitikus számítások és végeselemes szimulációk mind közel ugyanazt az eredményt szolgáltatották a Globocer gömbhéj erősítésű fémhab esetén, ami alátámasztja, hogy szerkezeti merevség helyett magát az effektív rugalmassági modulusz értékét kaptuk meg. Ezt erősíti meg az is, hogy a végeselemes modellek esetén, illetve az analitikus becsléseknél is tisztán képlékeny anyagmodellekkel dolgoztunk. A többi erősítőanyag esetében nem állt rendelkezésemre megfelelő méretű és mennyiségű anyag a mérések elvégzéséhez, azonban már a fent említett eredmény is kiemelkedő, és a részeredmények azt sugallják, hogy minden más erősítőanyag esetén ugyanilyen jó egyezést kaptunk volna, így nem csak egy összetétel és geometriafüggő szerkezeti merevség értéket ismerünk, hanem egy olyan jellemzőt, amely csak az összetételtől függ, vagyis az effektív rugalmassági moduluszt.

8. SUMMARY

In this thesis, one of the goals was to create an equation for the complete flow curve of metal matrix syntactic foams. The variables in this equation depend only on the mechanical properties of the matrix and the filler material, and the volume fraction of the filler particles.

$$\sigma_{f, foam} = \sigma_{foam} + b\sigma_{matrix}\varepsilon + 10b\sigma_{matrix}\varepsilon^3 - \sigma_{foam}e^{(-100\varepsilon)}$$

The advantages of this formula are to provide a good estimation for the whole flow curve, and not only for the ready-made materials, but also those material combinations which have not yet been created. These properties make this equation a useful tool to make the design process quicker and more efficient.

If this formula was used as a material property in finite element method then everything gets simplified. The geometry can be modeled as a solid body. This is a great outcome, because the problem of placing the filler particles in random places, yet close enough to each other, cease to exist.

The abnormal behavior of the structural stiffness in the measurements, however, is still not solved. Several types of methods were used to solve this issue. One of the methods was the modal analysis, which gave the best correlation with the analytical and finite element results. The reason is that in this measurement the stresses inside the material are really small, which means that the material behaves linear elastic. If it is true, then the measured and calculated structural stiffness are equivalent to the effective Young's modulus.

In the analytical and finite element analysis linear elastic material properties was used, and the modal analyses results were similar to the results of these analyses. This means that the effective Young's modulus was successfully measured in the aluminum matrix syntactic foam reinforced by Globocer hollow spheres. These result suggest, that if the foam was compressed there is not any linear elastic part of the flow curve. This property of the metal matrix syntactic foams needs further investigation.

9. TOVÁBBI KUTATÁSI TERVEK

A kutatásom során számos megválaszolatlan kérdés maradt, ezeket foglalom össze ebben a fejezetben, kitekintést adva a további feladatok irányába.

- A zömítés során kapott szerkezeti merevség értékek nagyban eltérnek a modális analízistől valamint az elmélettől. Ez annak tudható be, hogy képlékeny alakváltozás jön létre a mátrixanyagban a gömbhéjak között kialakuló vékony falakban. Ezt érdemes lenne közelebbről megvizsgálni.
- Ehhez kapcsolódóan a fémhab szerkezeti merevségét és a jelen dolgozatban meghatározott effektív rugalmassági modulusz értékével kapcsolatba hozni.
- Az általam megalkotott egyenletben minden paramétert analitikusan is levezetni, és bizonyítani.
- Valós beépítési módok között megvizsgálni mennyiben tér el a fémhab viselkedése a zömítő vizsgálatban, mint modellkísérletben megfigyelt viselkedéstől.

Ezeket a kérdéseket megválaszolva tovább lehetne segíteni a fémhabok minél hamarabb elterjedését a mindennapokban.

10. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. **Bálint Attila, Kovács Zsolt Ferenc, Szlancsik Attila**, *Fémgömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok mechanikai tulajdonságai*, TDK dolgozat, 2013
2. **A. Szlancsik, B. Katona, K. Bobor, K. Májlínger, I. N. Orbulov**, *Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres*, *Materials & Design* 83 (2015) 230–237
3. **A. Bálint, A. Szlancsik**, *Mechanical properties of iron hollow sphere reinforced metal matrix syntactic foam*, *Materials Science Forum*, Vol. 812, pp. 3-8, 2015
4. Mechanical testing of metals - Ductility testing – Compression test for porous and cellular metals, *ISO 13314:2011*
5. **Kallas DH, Chatten CK**, Buoyancy materials for deep submergence *Ocean Engineering* 4 (1969:1) 421-424
6. **Orbulov Imre Norbert**, Szintaktikus fémhabok PhD-értekezés, 2009.
7. <http://www.twi-global.com/capabilities/additive-manufacturing/laser-metal-deposition/>
8. **Czvikovszky Tibor**, Lehet-e „zöld” a műanyag, *Mindentudás Egyeteme előadás*, VII. szemeszter, 4. előadás, 2005. október 3.
9. **David B. Dittenber, Hota V.S. GangaRao**, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, *Composites: Part A* 43 (2012) 1419-1429
10. **Dung D. Luong, Oliver M. Strbik III, Vincent H. Hammond, Nikhil Gupta, Kyu Cho**, Development of high performance lightweight aluminium alloy/SiC hollow sphere syntactic foams and compressive characterization at quasi-static and high strain rates, *Journal of Alloys and Compounds* 550 (2013) 412-422
11. **G.H. Wu, Z.Y. Dou, D.L. Sun, L.T. Jiang, B.S. Ding, B.F. He**, Compression behaviors of cenosphere-pure aluminium syntactic foams, *Scripta Materialia* 56 (2007) 221-224

12. **Csilla Kádár, Kristián Máthis, Imre N. Orbulov, František Chmelik**, Monitoring the failure mechanisms in metal matrix syntactic foams during compression by acoustic emission, *Materials Letters* 173 (2016) 31–34
13. **Prabhakar R. Marur**, Numerical estimation of effective elastic moduli of syntactic foams, *Finite Elements in Analysis and Design*, (2010.november) 1001–1007
14. **D.P. Mondal, N. Ramakrishnan, S. Das**, FEM modeling of the interface and its effect on the elastio-plastic behavior of metal matrix composites, *Materials Science and Engineering A* 433 (2006) 286–290
15. **P. Li, N. Petrinic, C.R. Siviour**, Finite element modelling of the mechanism of deformation and failure in metallic thin-walled hollow spheres under dynamic compression, *Mechanics of Materials* 54 (2012) 43–54
16. **Ming Yu, Ping Zhu, Yingqi Ma**, Experimental study and numerical prediction of tensile strength properties and failure modes of hollow spheres filled syntactic foams, *Computational Material Science*, (2012.october) 232–243
17. **Ming Yu, Ping Zhu, Yingqi Ma**, Global sensitivity analysis for the elastic properties of hollow spheres filled syntactic foams using high dimensional model representation method, *Computational Material Science*, (2012.august) 89–98
18. **G. Nian, Y. Shan, Q. Xu, S. Qu**, Effects of hollow particle shape and distribution on the elastic properties of syntactic foams: 3D computational modeling, *Computational Materials Science* 95 (2014) 106–112
19. **A. Jung, S. Diebels**, Modelling of metal foams by a modified elastic law, *Mechanics of Materials* 101 (2016) 61–70
20. **C. Liu, Y. X. Zhang, C. Yang**, Numerical modelling of mechanical behaviour of aluminium foam using a representative volume element method, *International Journal of Mechanical Sciences* 118 (2016) 155–165
21. **J. B. Ferguson, J. A. Santa Maria, B. F. Schultz, P. K. Rohatgi**, Al–Al₂O₃ syntactic foams – Part II: Predicting mechanical properties of metal matrix syntactic foams reinforced with ceramic spheres, *Materials Science & Engineering A* 582 (2013) 423–432

22. **C.A. Vogiatzis, A. Tsouknidas, D.T. Kountouras, S. Skolianos**, Aluminum – ceramic cenospheres syntactic foams produced by powder metallurgy route, *Materials & Design* 85 (2015. november 15.) 444-454
23. **P. R. Marur**, Influence of imperfect interface on the elastic moduli of syntactic foams, *Computational Materials Science* 46 (2009) 327–332
24. **R. Pal**, New models for effective Young’s modulus of particulate composites, *Composites: Part B* 36 (2005) 513–523
25. **R. M. Christensen**, Mechanics of composite materials, *New York: Wiley; 1979*
26. **M. Mooney**, The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles, *J Colloid Sci* 1951;6:162–70.
27. **M. Porfiri, N. Gupta**, Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites, *Composites: Part B* 40 (2009) 166–173
28. **Lorenzo Bardella, Alessandro Sfreddo, Carlo Ventura, Maurizio Porfiri, Nikhil Gupta**, A critical evaluation of micromechanical models for syntactic foams, *Mechanics of Materials*, 50 (2012) 53-69
29. **Szlancsik Attila**, Fémgömbhéj erősítésű szintaktikus fémhabok fejlesztése és modellezése, *Szakedolgozat*, 2014
30. **H. M. Jaeger, S. R. Nagel**, Physics of the Granular State, *Science* 5051 (1992) 1523–1531
31. **S. Torquato, T. M. Truskett, P.G. Debenedetti**, Is random close packing of spheres well defined?, *Phys Rev. Lett.* 84 (2000) 2064–2067
32. **A. B. Watts, H. Ford**, On the basic yield stress curve for a metal, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 169 (1955), pp. 1141–1156
33. **Ziaja György**, Alakítástechnika előadásjegyzet, 2004 április
34. **James M. Carson, John M. Hawn**, Some properties of iron, copper, and selected aluminum alloys including true stress-true strain at reduced temperature, *Technical report AFML-TR-68-251, september 1968*

35. ASM Handbook Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials
36. **Balázs Dávid Ágoston**, Szintaktikus fémhabok rugalmassági tulajdonságainak becslési módszerei, *Szakdolgozat*, 2015

11. MELLÉKLET

11.1. A gömbhéj kiosztó program kódja C++ -ban

```
// Alu_spheres_v3.cpp : Defines the entry point for the console application.
//

#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <string>
#include <time.h>

#define filename "spheres.txt"
#define output_filename "result.ptb"

using namespace std;

//Global variables
int no_spheres;
float* spheres;
int no_spheres_in;
float** spheres_in;

float XDIM, YDIM, V, ZDELTA, ZOL, MIN_DIST, MAX_DIST, TARGET_PCT, TARGET;
int Z_NO, MAX_TRIES;
float** AREAS;
int** OL_SPHERES;

float sphere_put_in(float r, float x, float y, float z, int area_no, int contact_no) {
    double dist;
    double volume_to_fill = 4.0 / 3.0 * r*r*r * 3.14159;
    bool nok = false;
    int close_no = 0;
    if (area_no == 0) {
        for (int i = 0; i < no_spheres_in; i++) {
            dist = sqrt(pow(x - spheres_in[i][1], 2) + pow(y - spheres_in[i][2], 2) + pow(z - spheres_in[i][3], 2));
            if (dist < (r + spheres_in[i][0] + MIN_DIST)) {
                nok = true;
                return 0;
            }
            else if (dist <= (r + spheres_in[i][0] + MAX_DIST)) {
                close_no++;
            }
        }
    }
    else {
        for (int i = AREAS[area_no-1][1]+1; i < no_spheres_in; i++) {
            dist = sqrt(pow(x - spheres_in[i][1], 2) + pow(y - spheres_in[i][2], 2) + pow(z - spheres_in[i][3], 2));
            if (dist < (r + spheres_in[i][0] + MIN_DIST)) {
                nok = true;
                return 0;
            }
            else if (dist <= (r + spheres_in[i][0] + MAX_DIST)) {
                close_no++;
            }
        }
    }
}
```

```

    }
}
for (int i = 0; i < AREAS[area_no-1][2]; i++) {
    dist = sqrt(pow(x - spheres_in[OL_SPHERES[area_no-1][i]][1], 2) + pow(y -
spheres_in[OL_SPHERES[area_no - 1][i]][2], 2) + pow(z - spheres_in[OL_SPHERES[area_no
- 1][i]][3], 2));
    if (dist < (r + spheres_in[OL_SPHERES[area_no - 1][i]][0] + MIN_DIST)) {
        nok = true;
        return 0;
    }
    else if (dist <= (r + spheres_in[OL_SPHERES[area_no - 1][i]][0] + MAX_DIST)) {
        close_no++;
    }
}
}

if (!nok && close_no >= contact_no) {
    spheres_in[no_spheres_in][0] = r;
    spheres_in[no_spheres_in][1] = x;
    spheres_in[no_spheres_in][2] = y;
    spheres_in[no_spheres_in][3] = z;
    return volume_to_fill;
}
return 0;
}

void area_fill(int area_no) {
    int no;
    int x_max = (int)(XDIM * 1000);
    int y_max = (int)(YDIM * 1000);
    int z_max = (int)(ZDELTA * 1000);
    float z_min = area_no*(ZDELTA - ZOL);
    float x, y, z;
    float V;
    int contact_no;
    int ol_index = 0;

    while (AREAS[area_no][0] < TARGET) {
        if (no_spheres_in < 3) {
            contact_no = no_spheres_in;
        }
        else {
            contact_no = 3;
        }
        do {
            no = rand() % no_spheres;
        } while (spheres[no] == 0);
        for (int i = 0; i < MAX_TRIES; i++) {
            x = (float)(rand() % x_max) / 1000.0;
            y = (float)(rand() % y_max) / 1000.0;
            z = (float)(rand() % z_max) / 1000.0 + z_min;
            V = sphere_put_in(spheres[no], x, y, z, area_no, contact_no);
            if (V > 0) {
                AREAS[area_no][0] += V;
                AREAS[area_no][1] = no_spheres_in;
                spheres[no] = 0;
                if (z >= (z_min + ZDELTA - (ZOL+1))) {
                    if (area_no < (Z_NO - 1) && (z >= (z_min + ZDELTA - ZOL))) {
                        AREAS[area_no + 1][0] += V;
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        OL_SPHERES[area_no][ol_index] = no_spheres_in;
        ol_index++;
    }
    no_spheres_in++;
    cout << AREAS[area_no][0] << '\t' << no_spheres_in << endl;
    break;
}
}
}
AREAS[area_no][2] = ol_index;
}

int main()
{
    //Get the dimensions to fill
    cout << "Adja meg a kitoltendo terfogat mereteit (mm)!" << endl;
    cout << "X: ";
    cin >> XDIM;
    cout << "Y: ";
    cin >> YDIM;
    cout << "Sav merete (Z): ";
    cin >> ZDELTA;
    cout << "Atfedes (Z): ";
    cin >> ZOL;
    cout << "Savok szama (Z): ";
    cin >> Z_NO;
    V = XDIM*YDIM*((ZDELTA*Z_NO) - (ZOL*(Z_NO - 1)));
    cout << "Kitoltendo terfogat: " << V << " mm^3" << endl << endl;
    AREAS = new float*[Z_NO];
    OL_SPHERES = new int*[Z_NO];
    for (int i = 0; i < Z_NO; i++) {
        AREAS[i] = new float[3];
        AREAS[i][0] = 0; //Filled volume
        AREAS[i][1] = 0; //No. last sphere
        OL_SPHERES[i] = new int[1000];
    }
    cout << "Minimalis gombtavolsag (mm): ";
    cin >> MIN_DIST;
    cout << "Maximalis gombtavolsag (mm): ";
    cin >> MAX_DIST;
    cout << "Egy gomb berakasahoz probalkozasok szama: ";
    cin >> MAX_TRIES;
    cout << "Savlepeshez elerendo terkitoltes (%): ";
    cin >> TARGET_PCT;
    TARGET = XDIM*YDIM*ZDELTA*TARGET_PCT / 100.0;
    cout << "Gomb-sugarak betoltese folyamatban..." << endl;

    //Load the spheres into spheres[] array
    no_spheres = 0;
    no_spheres_in = 0;
    ifstream fs;
    string line("");
    fs.open(filename);
    while (!fs.eof())
    {
        getline(fs, line);
        if (line.compare("") != 0) {
            no_spheres++;
        }
        else {

```

```

        exit;
    }
}
fs.close();
spheres = new float[no_spheres];
spheres_in = new float*[no_spheres];
for (int i = 0; i < no_spheres; i++) {
    spheres_in[i] = new float[4];
    spheres_in[i][0] = 0;
}
fs.open(filename);
for (int i = 0; i < no_spheres; i++) {
    getline(fs, line);
    spheres[i] = stof(line);
}
fs.close();
cout << "Gomb-sugarak betoltese KESZ!" << endl;

//Filling the areas
srand(time(NULL));
for (int i = 0; i < Z_NO; i++) {
    area_fill(i);
}

//Saving the result
ofstream ofs;
ofs.open(output_filename);
ofs << "!\# Pro/TABLE" << endl << endl;
ofs << "!\ idx" << '\t' << "d5(0.19)" << '\t' << "d3(0.012778459)" << '\t' <<
"d4(0.721935599)" << '\t' << "d6(0.846634567)" << endl;
for (int i = 0; i < no_spheres_in; i++) {
    ofs << i + 2 << '\t' << spheres_in[i][0] * 2 << '\t' << spheres_in[i][1] << '\t'
<< spheres_in[i][2] << '\t' << spheres_in[i][3] << endl;
}
ofs.close();

getchar();
return 0;
}

```

11.2. A gömbhéj kiosztó program Matlab-ban

```
clear;

% radia of spheres
r = load('spheres.txt');
r = [r;r;r];
r_atlag = mean(r);
N = length(r);
r2 = zeros(N,1);
display('Körök sugarai beolvasva');

% téglatest méretei mm-ben
a = 10;
b = 10;
c = 12;
sav = 7;
d = 0.01; % minimális távolság a gömbök között
D = 0.3; % maximális távolság a gömbök között
termax1 = 48;
termax2 = 48;
termax3 = 60;
probalkozasok_szama = 200000;

% coordinates of the spheres
x = zeros(N,1);
y = zeros(N,1);
z = zeros(N,1);

% 1. gömb lerakása
x(1) = a/2;
y(1) = b/2;
z(1) = 0;

Xmin = x(1) - 2*r_atlag;
Xmax = x(1) + 2*r_atlag;
Ymin = y(1) - 2*r_atlag;
Ymax = y(1) + 2*r_atlag;
Zmin = 0;
Zmax = z(1) + 2*r_atlag;

% 2. gömb lerakása
for i = 1:1000
    x(2) = (Xmax-Xmin)*rand + Xmin;
    y(2) = (Ymax-Ymin)*rand + Ymin;
    z(2) = (Zmax-Zmin)*rand + Zmin;

    dist = pdist([x(1:2),y(1:2),z(1:2)]) - r(1) - r(2);
    f1 = dist > d;
    f2 = dist < D;

    if(f1 && f2)
        display(['Sikerült a 2. gömb :) ', num2str(i), '. próbálkozásra']);
        Xmin = max(0,min(x(1:2)) - 2*r_atlag);
        Xmax = min(a,max(x(1:2)) + 2*r_atlag);
        Ymin = max(0,min(y(1:2)) - 2*r_atlag);
        Ymax = min(b,max(y(1:2)) + 2*r_atlag);
        Zmin = max(0,min(z(1:2)) - 2*r_atlag);
```

```

        Zmax = min(sav,max(z(1:2)) + 2*r_atlag);
        break;
    end
end

% 3. gömb lerakása
for i = 1:10000
    x(3) = (Xmax-Xmin)*rand + Xmin;
    y(3) = (Ymax-Ymin)*rand + Ymin;
    z(3) = (Zmax-Zmin)*rand + Zmin;

    rsum = Rsum(r,3);

    dist = pdist([x(1:3),y(1:3),z(1:3)]) - rsum;
    f1 = dist > d;
    f2 = dist < D;

    if(min(f1) && min(f2))
        display(['Sikerült a 3. gömb :)', num2str(i), '. próbálkozásra'])
        Xmin = max(0,min(x(1:2)) - 1.5*r_atlag);
        Xmax = min(a,max(x(1:2)) + 1.5*r_atlag);
        Ymin = max(0,min(y(1:2)) - 1.5*r_atlag);
        Ymax = min(b,max(y(1:2)) + 1.5*r_atlag);
        Zmin = max(0,min(z(1:2)) - 1.5*r_atlag);
        Zmax = min(sav,max(z(1:2)) + 1.5*r_atlag);
        break;
    end
end

r2(1:3) = r(1:3);
counter = 0;
k = 4;
Zmin2=0;
Zmax2=sav;
for i = 4:N
    for j = 1:probalkozasok_szama
        x(k) = (Xmax-Xmin)*rand + Xmin;
        y(k) = (Ymax-Ymin)*rand + Ymin;
        z(k) = (Zmax-Zmin)*rand + Zmin;

        rsum = r2(1:k-1) + r(i);
        dist = sqrt( (x(1:k-1) - x(k)).^2 + (y(1:k-1) - y(k)).^2 + (z(1:k-1) - z(k)).^2) - rsum;

        f1 = dist > d;
        f2 = dist < D;
        f = sum(f1+f2==2);
        if(f==3 && min(f1))
            display(['Sikerült a ', num2str(k), '. gömb :)', num2str(j), '. próbálkozásra'])
            ter = 100*sum(4/3*r2(1:k).^3*pi) / (a*b*Zmax2);
            ter2 = 100*sum(4/3*r2(1:k).^3*pi) / (a*b*c);
            display(['Lokális térkitöltés: ', num2str(ter), '          GLOBÁLIS
TÉRKITÖLTÉS: ', num2str(ter2)]);
            Xmin = max(0,min(x(1:k)) - 1*r_atlag);
            Xmax = min(a,max(x(1:k)) + 1*r_atlag);
            Ymin = max(0,min(y(1:k)) - 1*r_atlag);
            Ymax = min(b,max(y(1:k)) + 1*r_atlag);

```

```

Zmin = max(Zmin2,min(z(1:k)) - 1*r_atlag);
Zmax = min(Zmax2,max(z(1:k)) + 1*r_atlag);

if(Zmax==sav && ter>=termax1)
    Zmin2 = Zmin + sav-2;
    Zmax2 = Zmax + sav-2;
    counter = counter + 1;
elseif(counter>0 && ter>=termax2)
    Zmin2 = Zmin + sav-2;
    Zmax2 = Zmax + sav-2;
    counter = counter + 1;
end

break;
end
if(Zmax>=c && ter>=termax2)
    break;
end
end
if(Zmax>=c && ter>=termax2)
    display('kész van, HOL A DOKTORI???');
    break;
end
if(j >= probalkozasok_szama)
    display('Gombhéj léptetés');
else
    r2(k) = r(i);
    k = k+1;
end

end

end

h = i ;
w=0;
q=0;
for i = h+1:N
    for j = q:0.05:a
        for u = 0:0.05:b
            for l = 0:0.05:c
                x(k) = j;
                y(k) = u;
                z(k) = l;

                rsum = r2(1:k-1) + r(i);
                dist = sqrt( (x(1:k-1) - x(k)).^2 + (y(1:k-1) - y(k)).^2 +
(z(1:k-1) - z(k)).^2) - rsum;

                f1 = dist > d;
                f2 = dist < D;
                f = sum(f1+f2==2);
                if(f==3 && min(f1))
                    display(['Sikerült a ',num2str(k),'. gömb :'),
num2str(q),'. próbálkozásra'])
                    ter2 = 100*sum(4/3*r(1:k).^3*pi) / (a*b*c);
                    display(['Lokális térkitöltés: ', num2str(ter), '
GLOBÁLIS TÉRKITÖLTÉS: ', num2str(ter2)]);
                    w = 1;
                    break;

```

```

        end

        end
        if (w==1)
            break;
        end

        end
        if (w==1)
            q=j;
            r2(k) = r(i);
            k = k+1;
            break;
        end
    end
    if (w==1 && ter2 >=termax3)
        display('kész van, HOL A DOKTORI???');

        break;
    elseif (w==0)
        display(num2str(k), 'kakaó');

        break;
    end
    display(num2str(k));
    w = 0 ;
end
w=0;
q=0;
h = i;
display('második lefutás');
for i = h+1:N
    for j = q:0.05:a
        for u = 0:0.05:b
            for l = 0:0.05:c
                x(k) = j;
                y(k) = u;
                z(k) = l;

                rsum = r2(1:k-1) + r(i);
                dist = sqrt( (x(1:k-1) - x(k)).^2 + (y(1:k-1) - y(k)).^2 +
(z(1:k-1) - z(k)).^2) - rsum;

                f1 = dist > d;
                f2 = dist < D;
                f = sum(f1+f2==2);
                if (f==3 && min(f1))
                    display(['Sikerült a ', num2str(k), '. gömb :)',
num2str(j), '. próbálkozásra'])
                    ter2 = 100*sum(4/3*r(1:k).^3*pi) / (a*b*c);
                    display(['Lokális térkitöltés: ', num2str(ter), '
GLOBÁLIS TÉRKITÖLTÉS: ', num2str(ter2)]);
                    w = 1;
                    break;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
        if (w==1)
            break;
        end

    end
    if (w==1)
        q=j;
        r2(k) = r(i);
        k = k+1;
        break;
    end
end
if (w==1 && ter2 >=termax3)
    display('kész van, HOL A DOKTORI???');
    break;
elseif (w==0)
    break;
end
display(num2str(k));
w=0;

end
scatter3(x(1:k),y(1:k),z(1:k))
axis equal
xlim([0 a]);
ylim([0 b]);
zlim([0 c]);

Da = 2*r2;
A = [(2:k+1)',Da(1:k),x(1:k),y(1:k),z(1:k)];
fileID = fopen('result.txt','w');
fprintf(fileID,'%12s \r\n \r\n','!# Pro/TABLE');
fprintf(fileID,'%5s \t %9s \t %16s \t %16s \t %16s \r\n','!
idx','d5(0.19)','d3(0.012778459)','d4(0.721935599)','d6(0.846634567)');
fprintf(fileID,'% -4.0f \t % -6.3f \t % -6.3f \t % -6.3f \t % -6.3f \r\n',A');
fclose(fileID);

```