

Debreceni Egyetem
Műszaki Kar
Gépészmérnöki tanszék



Fémhabok anyagvizsgálata és modellezése

Készítette: **Varga Tamás Antal III. éves gépészmérnök hallgató**

Belső konzulens:	Dr. Mankovits Tamás
Társ konzulens:	Dr. Kocsis Imre
Tanszékvezető:	Ráthy Istvánné Dr.

Lezárás dátuma: 2014. november 14.

Debrecen

2014.

Tartalomjegyzék:

1. Bevezetés	4
2. Irodalomkutatás	5
2.1. Fémhabok gyártástechnológiája	5
2.2. Fémhab anyagvizsgálata és modellezése	7
2.3. Fémhab alkalmazási területei	9
3. Fémhab alapanyagának vizsgálata	13
3.1. Alapanyag és fémhab próbatestek előkészítése a mikroszkópos és röntgenes vizsgálathoz.....	13
3.2. Alapanyag mikroszkópos vizsgálata.....	15
3.3. Alapanyag röntgenes vizsgálata	15
3.4. Alapanyag nyomóvizsgálata	17
3.5. Mért eredmények összehasonlítása a gyári adatokkal	18
4. Fémhab próbatestek előállítása az ISO 13314 szerint.....	19
4.1. Fémhab cellaátmérőjének meghatározása.....	19
4.2. Fémhab próbatestek méretre vágása	21
4.3. A legyártott próbatestek méreteinek elemzése	22
5. Fémhab struktúra elemzése	25
5.1. Makro felvételek elkészítése	25
5.2. Területelemzéses vizsgálat.....	26
5.3. Vonalelemzéses vizsgálat.....	27
5.4. A két vizsgálati módszer összehasonlítása.....	28

6. Fémhab modellezési lehetőségei.....	29
6.1. Idealizált 3D-s modellek és azok tulajdonságai	29
6.2. Ipari CT felvétel alapján 3D geometria rekonstruálása	31
7. Eredmények	35
8. Befejezés	37
9. Irodalomjegyzék.....	38
Ábrajegyzék	42
Táblázatjegyzék	44
Mellékletek	44

1. BEVEZETÉS

A vizsgálatunk anyaga zárt cellás alumínium hab, amelyet a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszéke gyártott le. A fémhabunk alapanyaga F3S.20S Metal Matrix Composite Durcalan. Mit is kell tudni a fémhabokról? Ez egy viszonylag új anyag, amelynek kiváló a hővezetési tényezője, hangszigetelő képessége, illetve nagyon jó az energia elnyelő képessége. Fémhabokat mára már sokféle alapanyagból gyártanak.

Az általunk végzett vizsgálatokra azért van nagy szükség, mivel a fémhabok felhasználási területe rendkívül széleskörű. Az autóiparban és a biomechanikában mindennapi anyagnak tekinthető. Például a fémhabok ortopédiai alkalmazásában komoly lehetőségek rejlenek, a szivacsos csontállományhoz nagyon hasonló szerkezet a csontnövekedéshez ideális körülményeket teremt, kis sűrűsége, az alapanyag jelentős teherbírása kifejezetten alkalmassá teszi a hosszú távú használatra.

A vizsgálatunk első részeként az alapanyagot vetettük elemzések alá, annak anyagösszetételét EDX röntgen készülékkel vizsgáltuk, majd meghatároztuk a benne lévő SiC szemcsék nagyságát SEM mikroszkóppal. Ezután az alapanyag nyomóvizsgálatából meghatároztuk annak rugalmassági modulusát.

Következő lépésben a fémhab struktúráját kezdtük el vizsgálni. Először meghatároztuk az átlagos cellaátmérőt egy SEM mikroszkóp segítségével, amely a kocka alakú próbatest legyártásához volt szükséges. Ezután a próbatest felületeiről makro felvételeket készítettünk. Az elkészített képek segítségével megvizsgáltuk az anyag vonalmenti sűrűségét, illetve képelemző szoftver segítségével meghatároztuk a területarányt. Ezen adatok segítségével építettünk fel egy idealizált 3D-s modellt CAD szoftver segítségével. A fémhab próbatesteket ipari komputertomográffal is megvizsgáltuk, hogy minél pontosabb képet kapjunk a fémhabunk belső struktúrájáról. A kutatás során mindvégig az a cél lebegett előttünk, hogy olyan vizsgálatokat végezzünk, amelyek egy későbbi végeselemes szimuláció input adatai lesznek.

A vizsgálatunknak fontos szerepe van a mai világban, hiszen egyre több helyen alkalmazzák a fémhabokat, ettől függetlenül ezeknek anyagszerkezetéről viszonylag keveset tudunk.

2. IRODALOMKUTATÁS

Magyar, de inkább külföldi publikációk feldolgozásával irodalomkutatót végeztünk a fémhabok gyártástechnológiájával, vizsgálati módszereivel és alkalmazási területeivel kapcsolatban. Ez elengedhetetlen, hiszen az anyag minden eddigi tulajdonságát meg kell ismernünk, hogy azt vizsgálni tudjuk.

2.1. Fémhabok gyártástechnológiája

A gázzal készült kompozitok, a fémhabok előállításával már az ötvenes években foglalkoztak, de a kezdeti sikertelen kísérletek után a kutatás abbamaradt. A 90-es években azonban a fémhab kutatások újabb lendületet kaptak. Napjainkban számos módszer használatos fémhabok előállítására [1-4]. Léteznek öntéssel, fémleválasztással, porkohászati eljárásokkal, fecskendezéssel fémbevonással készülő fémhabok (1. táblázat).

1. táblázat Fémhab gyártásának módszerei

Öntés	Porkohászat	Fémmeel való bevonás
• Direkt habosítás gázképző adalékkal • Direkt habosítás buborékoltatással • Granulátumra öntés • Üreges gömbök egyesítése fémmeel • Minta utáni öntés	• Öntőpépes habosítás • Lazapor-szinterelés • Üreges granulátum szinterelése • Szálkohászat • Öntőpéppel telített szivacs szinterelése • Pórusokba zárt gázzal habosítás • Szinterelési-kioldási eljárás	• Polimer szálak fémmeel való bevonása • Fémmeel oldott gázokkal történő habosítás

Az általunk készített fémhabok gyártási folyamata a következő volt:

Az alapanyag megolvastásához egy olvasztó kemencét (1. ábra) használtunk, amelyet 700 °C hőmérsékletre állítottunk be. A hőmérséklet felfutásáig történő idő alatt a többi előkészítési műveletek következtek. A TiH₂ mennyiség a szakirodalomban 1-2 tömeg% között szokott lenni, mi 1.5 % -ot használtunk. A TiH₂ port alufóliára helyezve egy 30 perces szárításra tettük a Denkal kemencébe (2. ábra) 200 °C-on.

A bekeverési edényünk (3. ábra) belső falát BN szuszpenzióval ecseteltük be, hogy az alumínium ne ragadjon az edényre. Ugyanezzel a szuszpenzióval ecseteltük be a

keverőszárat is. Az olvasztókemence 700 °C-os hőmérsékletének elérésekor, betettük olvadni az alapanyagunkat, ami az alkalmazott tömeg (50-100g) függvényében 15-20 *perc* alatt olvadt meg. A bekeverés művelete előtt 2-3 perccel a keverőszárat is a kemencébe dugtuk, hogy ne legyen hideg a bekeveréshez. Bekeveréskor az alufóliába csomagolt TiH₂ port az olvadékra dobtuk, majd a keverőszárral kb. 10000 *min*⁻¹ fordulatszámmal 20 másodpercig kevertük. Ezután még 50 másodpercig hőn tartottuk, ami alatt megindult a habosodás. Ezek után kivettük az edényt a kemencéből és az alját hideg vízben hűtöttük. Az edényből könnyen kivehető volt a kész fémhab.

A gyártáshoz a következő eszközök álltak rendelkezésünkre:

A habosítási műveletekhez szükség van egy olvasztó kemencére az alumínium megolvasztásához, egy másik előkészítő kemencére a TiH₂ kiszáritására esetleg hőkezelésére, egy bekeverő edényre, keverőszárra, motorra és egy precíziós mérlegre.

Alkalmazott eszközeink:

Hőker típusú olvasztó kemence (1. ábra)

Típus: Al-12

Gyártási év: 2002

Névleges feszültség: 230 *V*

Névleges teljesítmény: 3.5 *kW*

Névleges hőmérséklet: 1000 °C



1. ábra Hőker típusú olvasztó kemence [1]

Denkal típusú fogtechnikai kemence (2. ábra)

Típus: 6-K/1100

Gyártási év: 1990

Névleges feszültség: 230 *V*

Névleges teljesítmény: 2.5 *kW*

Névleges hőmérséklet: 1100 °C



2. ábra Előkészítő kemence [1]

Bekeverésre szolgáló edény (3. ábra)

Az edény két egymásba illő csődarabból került kialakításra. A nagyobbik átmérőjűnek az alját lezártuk. Ezzel a kialakítással nem folyik el az olvadt fém, illetve a megszilárdulás után az edény könnyen szétszedhető és a fémhab kivehető.



3. ábra Bekeverő edény [1]

Keverőszár: A keverő szár egy acél rúdra rögzített propeller volt.

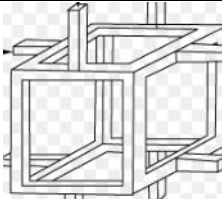
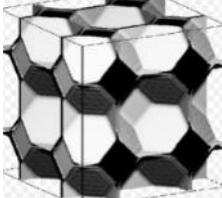
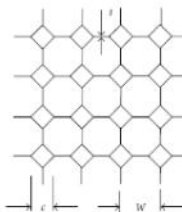
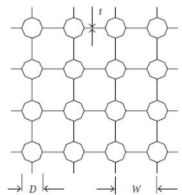
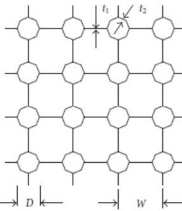
Akkus fúró-csavarozó: Bosch PSR 12

Precíziós mérleg: Kern EM400

2.2. Fémhab anyagvizsgálata és modellezése

A vizsgálati módszerek folyamán leginkább a fémhabok mechanikai tulajdonságaira vagyunk kíváncsiak. A három vizsgálni kívánt terület a fémhab alapanyaga, a fémhab relatív sűrűsége, térbeli elrendezkedése (cellák elrendezkedése, és ezeknek az alakja), tehát a struktúráját szeretnénk megismerni. A vizsgálat során a fémhab valós szerkezetét kívánjuk a legjobban modellezni, hiszen ez elengedhetetlen a későbbi vizsgálatok szempontjából [5]. Igaz, hogy a fémhabok egyre népszerűbbek, de a belső elrendeződés általában nem ismert, így a modellezéshez komoly apparátusokat szükséges igénybe venni. Az elmúlt években sok kutató foglalkozott a fémhabok végeselem szimulációjával kisebb-nagyobb sikerrel, amely nem túlzással a mérnöki tevékenységek egyik nagy kihívása napjainkban. A modellezés során túlnyomó részt nem a valós szerkezetet építették fel, hanem idealizált, egységcellákból felépített modelleket alkalmaztak. Az ehhez szükséges bemenő adatokat statisztikai elemzések alapján határozták meg. A fémhab struktúráját általában 2D-ben, vagy 3D-ben [6-10] építik fel. A 3D-s idealizált modelljének több fajtája is van (2. táblázat), ezek közül a leggyakrabban alkalmazott modell a Gibson-Ashby modell, ahol az egységcella kocka. Léteznek továbbá beágyazásos és statisztikus modellek is. Az általunk választott modell az ún. „weaker cruciform-stronger-hemisphere” modell.

2. táblázat Idealizált fémhab modellek

Idealizált fémhab modell megnevezése	Idealizált modell ábrája
Gibson-Ashby's Skeleton Cubic Cell modell [11]	
Simone-Gibson's Tetrakaidecahedral modell [12]	
Santosa and Weitzbiski's Truncated modell [7,13]	
Meguid's Cruciform-hemisphere modell [7,14]	
Weaker cruciform-stronger-hemisphere modell [7]	

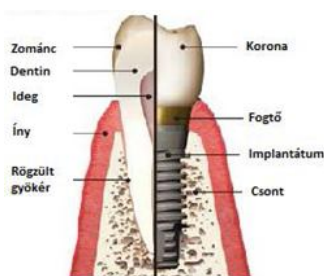
A 3D-s modell előállításának egy másik lehetséges eszköze az ipari komputertomográf (CT) alkalmazása, amelynek eredményeit tudjuk felhasználni a valós modell felépítésére. A berendezéshez való hozzáférés nem egyszerű. Az ipari komputertomográf által készített felvételeket 3D rekonstruálásra alkalmas szoftverrel kell feldolgozni. Különböző numerikus megközelítéseket is találhatunk, amelyek a fémhabok szimulációjához kapcsolódnak [5-10],[15,16]. A szimuláció elvégzéséhez szükségünk van néhány adatra (sűrűség, Young's modulus), amelyet csak az alapanyag vizsgálata után tudunk meghatározni. A szimuláció során továbbá ismernünk kell a fémhab struktúrájára is.

2.3. Fémhab alkalmazási területei

A fémhabot nagyon sok helyen alkalmazzák, mivel kiváló a hő- és hangszigetelő képessége, továbbá remek az energia elnyelő képessége [17-19]. Felhasználási területe nagyon széleskörű, ilyenek például az autóipar, hadiipar és a biomechanika [20,25]. A legjelentősebb alkalmazási területei a következők:

Orvosi alkalmazások:

fogimplantátumok: Titánhabokat alkalmaznak fogak pótlására, amelyet a 4. ábra láthatunk is [26].



4. ábra Titán fogimplantátum [26]

protézisek: A titán habok kiválóan alkalmasak protézisek készítésére, hiszen nagy szilárdságúak, kis rugalmassági moduluszúak, könnyűek és hasonlítanak a csont szerkezetéhez is, valamint biokompatibilisek. A titán és az ötvözetek elterjedtek a mozgásszervi sebészetben. A csontszövet ránó a felületén érdesített titánra, így beépülnek [27]. Különböző protézisekre láthatnak példát a 3. táblázatban.

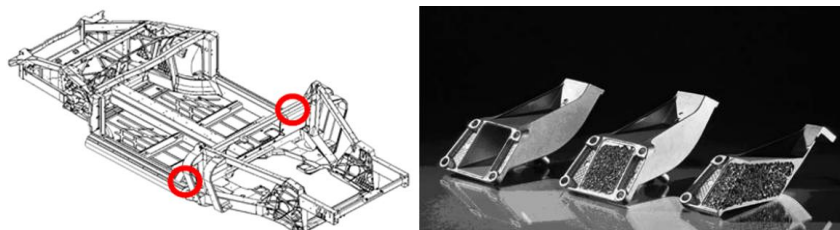
3. táblázat Különböző fémhab protézisek [27]

Alkalmazási terület	Anyag	Név	Gyártó	Kép
Térdprotézis	Porózus titán	CSTiTM (Cancellous-Structured Titanium TM)	Zimmer	
Gerinc implantátum	Titánhab	PlivioPore	Synthes	
Térdprotézis	Tantálhab	Trabecular Metal	Zimmer	

Csont-ék	Titánhab	BIOFOAM	Wright	
Csípő protézis vápa	Titánhab	Titanum Foam (TF)	DePuy	

Járműipari alkalmazások:

Fémhabokat alkalmaznak autók lökhárítójában, ajtóinak belsejében, vagy merevítésként küszöbök belsejében. Ezáltal nemcsak az utasok védelme javul, de jelentős súlycsökkenés, és ezáltal üzemanyag-megtakarítás is elérhető. Jelenleg alumíniumhabokat használnak például az Audi A8-ban, a Ferrari F430 sportkupékban (5. ábra) és a Siemens Combino® villamosaiban, buszaiban és vasúti kocsijaiban is [4].



5. ábra Járműipari alkalmazások [28-29]

Az LKR és a BMW tesztekét végez alumínium habból készített motortartó konzolokon (5. ábra) [29]. A 6. ábra egy gépkocsi, fémhab karosszéria elemének láthatjuk végeselem szimulációját, ütközés esetén.

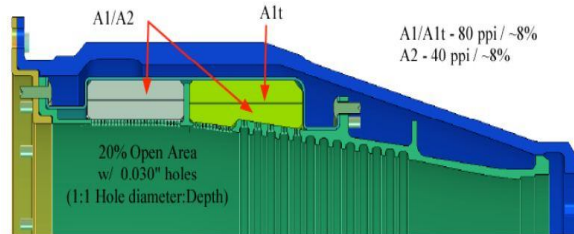


6. ábra Egy gépkocsi fémhab karosszéria elemének roncsolódása baleset esetén, illetve egy versenyautó ütközője [30-31]

A fémhabokat használják versenyautók ütközőjének is (6. ábra), mivel nagy az energiae nyerése, illetve használták a karunk által készített pneumobilokban is.

Repülőipari alkalmazások:

hajtóművek hangszigetelése: A NASA vizsgálatot végzett, amelyben egy Williams FJ44-3A turbóventillátoros repülőgép hajtóművébe nyílt cellás fémhabot helyeztek el, ezzel csökkentve a hajtómű hangját (7. ábra). A fémhab használatával 4-5 dB-el tudták csökkenteni a hajtómű zaját. [32]



7. ábra Egy Williams FJ44-3A típusú hajtóműben elhelyezett fémhab hangszigetelés [32-33]

repülőgépek szerkezeti elemei: Repülésben használnak habosított alumínium elemeket, elsősorban az utastérben, az ajtóknál, padlólapoknál, vagy akár a törzs részeiben is, például az Airbus 380-as repülőgépekben is használnak alumínium habot [26,31].

Űripari alkalmazások:

Rakéták, szatellitok külső és belső struktúrájában is alkalmaznak fémhabokat [34].



8. ábra Ariane 5 típusú rakétakúp prototípusa [34]

Munkagépeknél való alkalmazása:

Alumínium habból készítenek darukat is (9. ábra) [34].



9. ábra Alumínium habból készített emelő szerkezet [29]

Építőipari alkalmazások:

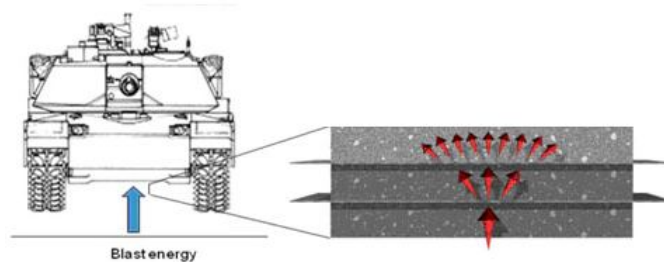
Alumínium habokból készítenek falazatokat, padlókat, rudakat, gépkocsi rámpákat, alagutak belső burkolatát. Az építőiparban jól ki tudják használni a fémhabok tűzállóságát (kb. 1200 °C), jó hangszigetelő és rezgéscsillapító képességét [34]. Az alumínium habokat magasutak és viaduktok alján hangszigetelésként is alkalmazzák [4]. A stockholmi Globe Aréna szerkezetében is található fémhab [31].



10. ábra Alumínium habból készült táblák [34]

Hadipari alkalmazások:

Páncélautó golyóvédő borítását is készítenek fémhabokból (11. ábra), mivel ennek az anyagnak jó az energia elnyelése.



11. ábra Alumínium habból harckocsi páncélzata [28]

3. FÉMHAB ALAPANYAGÁNAK VIZSGÁLATA

Az elemzések során elsőnek a fémhab alapanyagát vizsgáltuk meg, annak anyagösszetételét és egyéb tulajdonságait, majd ezeket összehasonlítottuk a gyártók által megadott adatokkal. A vizsgálat első lépéseként az alapanyagot elő kellett készíteni a mikroszkópos és röntgenes vizsgálatához. Ezt követően az alapanyagból 3 próbatestet készítettünk, amelyen nyomóvizsgálatot végeztünk el. A mikroszkópos illetve röntgenes vizsgálatot a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Anyagtechnológiai Laboratóriumában végeztük el. A próbatestek méretre vágását a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék Metallográfiai Laborjában végeztük.

3.1. Alapanyag és fémhab próbatestek előkészítése a mikroszkópos és röntgenes vizsgálatához

Mivel mind az alapanyag, mind pedig a fémhab próbatest előkészítése hasonló lépésekben zajlik, így azt itt részletezzük.

Lépések:

Polírozás: A mintadarab felülete ránézésre elegendően sima és az oldalai párhuzamosak egymással. A mikroszkópos vizsgálatához elengedhetetlen hogy a mintadarab felülete teljesen sima legye, ezért az anyagot fel kell polírozni. A polírozáshoz $3\mu\text{m}$ -os, illetve $1\mu\text{m}$ -os polírozó tárcsát használtunk. A tárcsákat a polírozás előtt vízzel megtisztítottuk, ezzel garantálva, hogy az előző polírozásból semmilyen más fémszemcse ne maradjon a tárcsán. A mosást követően a polírozó tárcsákat kicentrifugáztuk ez által a mosás során használt víz eltűnt a tárcsa felületéről.



12. ábra A fémhab alapanyagának polírozása és a polírozott munkadarab

[Forrás: saját készítés]

A polírozást STRUERS LaboPol-5 polírozó géppel végeztük 250 *1/min* fordulatszámmal (12. ábra). Első lépésben a 3 μ m-es polírozó tárcsát használtuk, amelyre gyémánt szuszpenziót vittünk fel a polírozás előtt. Ezzel a tárcsával 3 percig políroztuk a mintadarabot. Ezt követően az 1 μ m-es tárcsával políroztuk az anyagot szintén gyémánt szuszpenzió segítségével mindaddig, míg a felülete el nem kezdett „tükrösödni” (1,5-2 *perc*). A polírozások után a mintadarabot elmostuk, ezzel eltávolítva a felületén maradó fémszemcséket, illetve gyémánt szuszpenziót.

Szárítás: A polírozás utáni mosást követően, elengedhetetlen a rajta lévő vízmolekulákat eltávolítani a mintadarabról. Ezt egy METABO H-1650 1600W-os hőlégfúvóval végeztük (13. ábra).



13. ábra Fémhab szárítása [Forrás: saját készítés]

A mintadarab elhelyezése a mikroszkóp mintatartóján: A mikroszkóp mintatartóján az anyagot bepozícionáltuk törekedve arra, hogy a minta felülete vízszintes legyen, illetve minél közelebb legyen a minta előkészítőn található hengerhez. Ezzel garantáljuk, hogy a minta közel lesz a mikroszkóp katódjához, így sokkal pontosabb képet kapunk az anyagról. A pozicionáláshoz a mintatartó és a mintadarab közé karbon szalagot ragasztottunk (14. ábra).



14. ábra A minta előkészítése és a gépbe helyezett fémhab látható

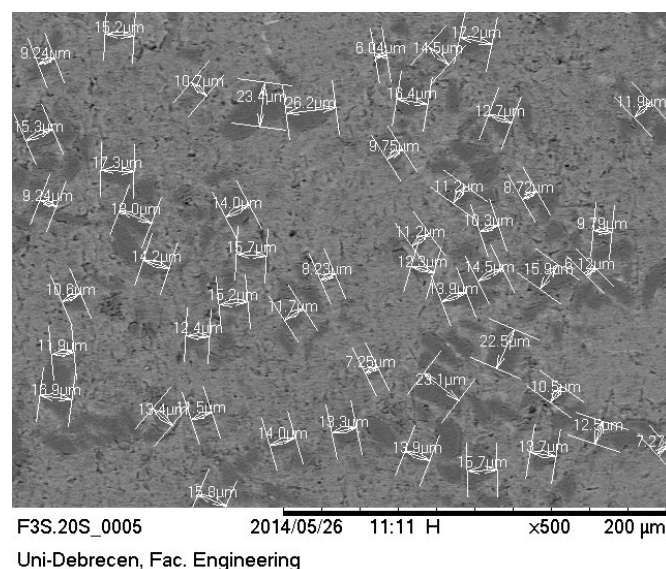
[Forrás: saját készítés]

Mintadarab behelyezése a mikroszkópba: A mintatartót behelyeztük a vizsgáló berendezésbe (14. ábra), majd a mintatartó tálcáját középre állítjuk a gépben, így garantálva azt, hogy az anyag közepét lássuk a mikroszkóp beindításakor.

3.2. Alapanyag mikroszkópos vizsgálata

A mikroszkópos vizsgálathoz Hitachi Tabletop 3030 SEM mikroszkópot használtunk. Az ajtó bezárása után vákuum alá helyeztük a kamrát. A teljes vákuum elérése körülbelül 3 percbe telik, ezután lehet elkezdeni a mikroszkópos vizsgálatot.

A mikroszkópos vizsgálat során az anyagban lévő SiC szemcsék közepes átmérőjét határoztuk meg. Ezt követően a mikroszkóp szoftvere segítségével x500-os nagyítású felvételt készítettünk az alapanyag felületéről, majd ezután a szemcsék átmérőjét beméreteztük. A gép szoftvere segítségével, μ pontossággal meg tudtuk határozni a SiC szemcséinek nagyságát. A 15. ábraán láthatjuk az alapanyagról készült felvételt.



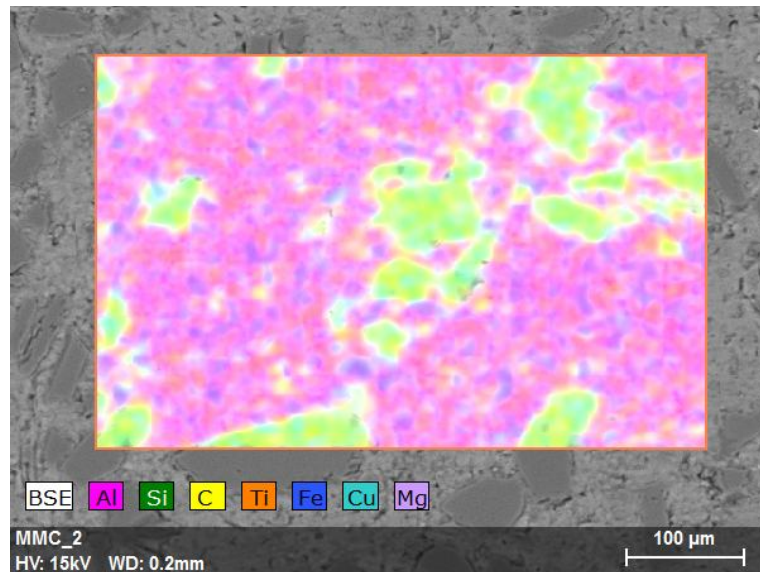
15. ábra SiC szemcsék átmérőjének meghatározása [Forrás: saját készítés]

A fémhab alapanyagáról 3 felvételt készítettünk, amelyen meghatároztunk a SiC szemcsék közepes átmérőjének nagyságát, amelynek átlaga 13.245 μm lett.

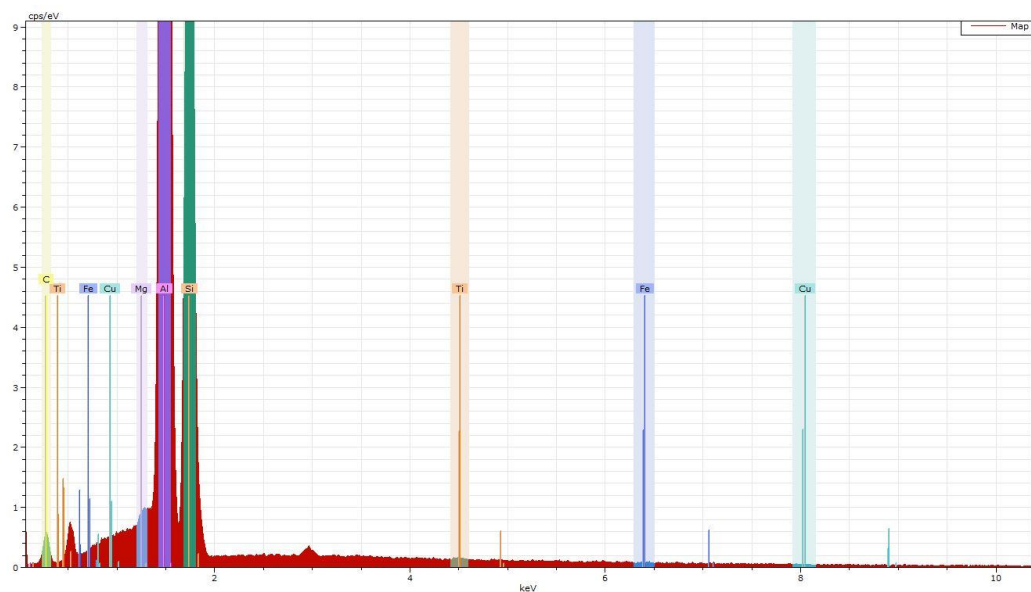
3.3. Alapanyag röntgenes vizsgálata

A röntgenes vizsgálatot a Hitachi Tabletop 3030 SEM mikroszkóphoz csatlakoztatott EDX röntgendetektorral végeztük el. A mikroszkóp segítségével kiválasztott területet a röntgendetektor segítségével vizsgáltuk meg, amely segítségével meghatároztuk a minta elemi összetételét egészen a bóról az ameríciumig bezárólag. A szoftver segítségével

meghatároztuk a mintát felépítő elemek %-os eloszlását (4. táblázat), illetve a mintáról anyag-összetételi térképet (16. ábra) és spektrumot (17. ábra) is készítettünk.



16. ábra Alapanyag EDX felvétele [Forrás: saját készítés]



17. ábra Alapanyag összetételének spektruma [Forrás: saját készítés]

A vizsgálatok végeztével a mintadarabot kivettük a mikroszkópból az alábbi módon:
A vizsgálatot követően a kamrát felengedtük levegővel. Amikor a nyomás kiegyenlített, vártunk 3 percet hogy a mikroszkóp katódja visszahúljön, ezzel megvédve a gépet a korai tönkremeneteltől. Ezt követően vettük ki a mintadarabot. A mintacserét követően kamra átszellőztetése mindössze 1 percet vett igénybe.

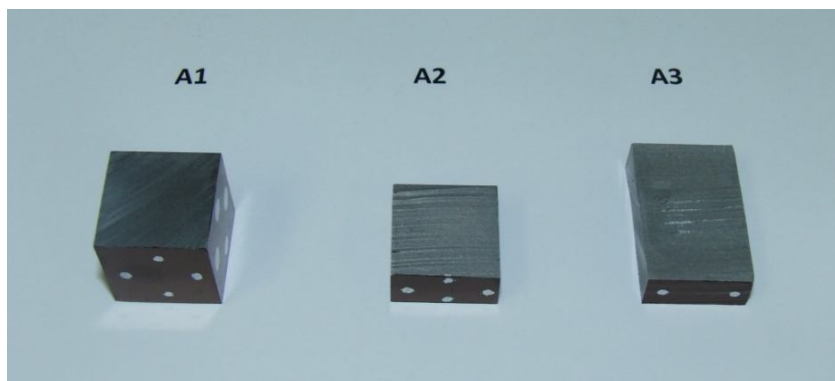
3.4. Alapanyag nyomóvizsgálata

A fémhab alapanyagából elsőnek próbatesteket készítettünk, amelyeken későbbiekben el tudtuk végezni a nyomóvizsgálatot. A próbatesteket egy STRUERS Labotom-15 típusú univerzális nagyteljesítményű vágógéppel vágtuk méretre (18. ábra). A próbatestekhez gyémántvágó korongot alkalmaztunk. A vágás során hűtővizet is használtunk. A vágások elvégzésével 3 próbatest került legyártásra (19. ábra), ezeken végeztük a nyomóvizsgálatot.

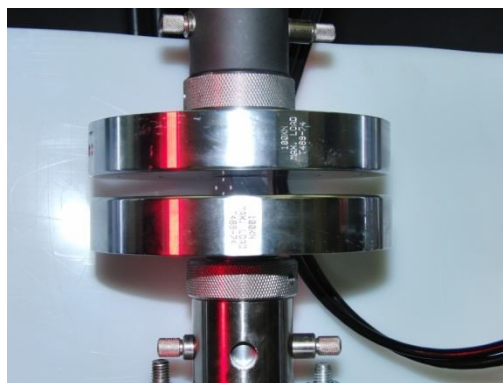


18. ábra Próbatestek méretre vágása [Forrás: saját készítés]

A nyomóvizsgálatot a Debreceni Egyetem Ortopédiai Klinika Biomechanikai Anyagvizsgáló laboratóriumában valósítottuk meg. A nyomóvizsgálatot egy INSTRON 8874 típusú biaxiális anyagvizsgáló berendezéssel (terhelőkapacitás: 25 *kN*) végeztük el. A vizsgálat során a befogópofák elmozdulásából mértük a hosszirányú alakváltozást, a keresztirányú alakváltozást INSTRON AVE FOV 200-as video extensométerrel detektáltuk. A vizsgálat során a laboratóriumban 26,2 °C és 50,4 %- os páratartalom volt, a vizsgálati sebesség pedig 1 *mm/perc*.



19. ábra Próbatestek [Forrás: saját készítés]



20. ábra Fémhab alapanyagának nyomóvizsgálata [Forrás: saját készítés]

A vizsgálat során meghatároztuk az alapanyag rugalmassági moduluszát, amely 97,20 *GPa* lett.

3.5. Mért eredmények összehasonlítása a gyári adatokkal

A mérési eredményeket és a gyártói adatokat a 4. táblázat tartalmazza. A sűrűség meghatározásához egy METRICA típusú digitális tolómérőt és egy KERN EW típusú 0,01 *gramm* pontosságú digitális laboratóriumi mérleget használtunk.

4. táblázat Gyártói adatok és mért eredmények összehasonlítása

Tulajdonságok	Gyártói adatok [35]	Mért adatok
Sűrűség (kg/m^3)	2850.00	2875.12
Rugalmassági modulusz (<i>GPa</i>)	98.60	97.20
Si tartalom (%)	9.30	9.21
Mg tartalom (%)	0.55	0.53
Fe tartalom (%)	0.11	0.11
Ti tartalom (%)	0.10	0.98
Cu tartalom (%)	0.01	0.01
SiC szemcsék közepes átmérője (μm)	12.80	13.24

A táblázat jól igazolja, hogy az általunk mért eredmények, illetve a gyártók adatok által megadott tulajdonságok [35] hasonlítanak egymáshoz, tehát a méréseink megfelelően pontosak voltak. A további vizsgálatok során az általunk mért eredményeket fogjuk használni.

4. FÉM HAB PRÓBATESTEK ELŐÁLLÍTÁSA AZ ISO 13314 SZERINT

A következőkben magát a legyártott fémhabunkat vizsgáltuk. Elsőnek a fémhab próbatestek előválogatására került sor, ahol eldöntöttük, hogy mely legyártott fémhabokon fogjuk elvégezni a vizsgálatokat (21. ábra).



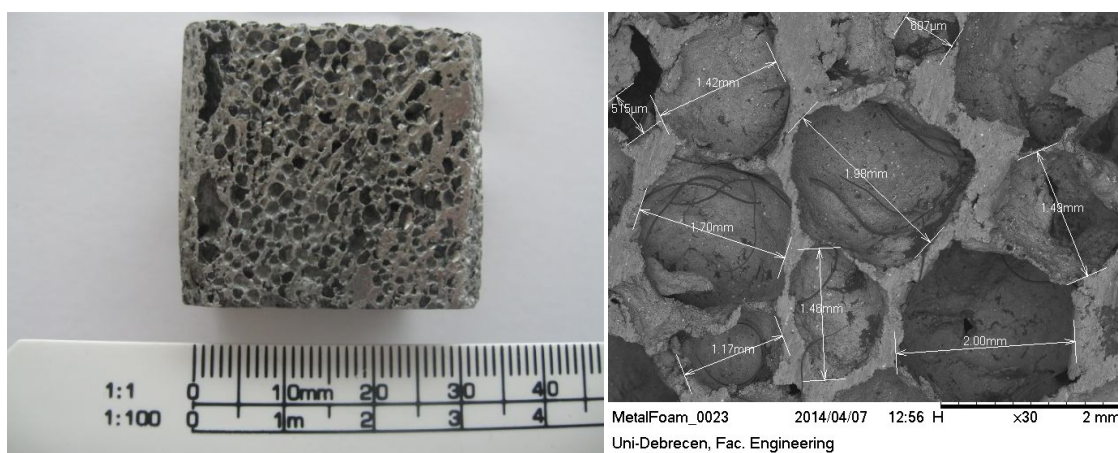
21. ábra Fémhabok kiválogatása a vizsgálatához [Forrás: saját készítés]

A legyártott fémhabokból próbatesteket állítottunk elő az ISO 13314 szabvány alapján [36], a későbbi nyomóvizsgálat elvégzése miatt. A szabvány azt tartalmazza, hogy a fémhab oldalainak legalább akkorának kell lenniük, hogy 10 db cella elférjen benne. Ezért elengedhetetlen dolog az, hogy meghatározzuk a fémhab próbatestek cellaátmérőit. Ezt követően meg kell dönteni az általunk legyártani kívánt próbatestek méreteiről. Legyártás után a próbatestek méreteit leellenőriztük, hogy azok megfelelnek-e az előbbiekben meghatározott méreteknak. A későbbiekben ezeken a próbatesteken fogunk nyomóvizsgálatot végezni.

4.1. Fémhab cellaátmérőjének meghatározása

A fémhabokat a korábbiakban meghatározott módon előkészítettük a mikroszkópos vizsgálatra. A mikroszkópos vizsgálat során szintén a Hitachi Tabletop 3030-as SEM elektronmikroszkópot használtuk. A vizsgálatot 3 próbatesten végeztük el összesen 9 felvételt készítve. A vizsgált felületről x30-os nagyítással készítettünk felvételeket. A vizsgált felületen a mikroszkóp szoftverének segítségével meghatároztuk a cellaátmérőket és ezen értékek alapján határoztuk meg az átlagos cellaátmérőt (22.

ábra). A meghatározott cellaátmérőket, és ezeknek átlagát a 5. táblázat tartalmazza.



22. ábra A vizsgált próbatest és a x30-es nagyítású mikroszkóp felvétel

[Forrás: saját készítés]

5. táblázat Átlagos cellaátmérők meghatározása

Próbatest sorszáma	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.01	2.09	1.51	0.50	1.02	1.44	0.65	0.51	1.52
2	1.30	1.94	1.05	0.72	0.68	1.13	1.59	1.42	0.59
3	1.19	0.88	1.78	2.37	1.77	1.34	1.34	0.61	1.34
4	0.85	1.16	1.49	2.08	1.95	1.59	1.48	1.98	1.18
5	1.2	1.75	0.89	1.67	1.45	2.44	1.15	1.70	1.52
6	1.14	0.71	1.75	0.69	1.71	1.52	1.64	1.49	0.86
7	0.74	0.88		0.64	1.69	0.67	2.24	1.46	1.25
8		0.99		1.50	1.48	1.43	1.76	1.17	1.67
9		0.62		0.92	1.69	1.98	1.05	2.00	0.78
10		1.91		1.81	0.77	1.44			1.52
11					1.32	1.05			1.42
Átlagos cellaátmérő az adott felvételen (mm)	1.06	1.29	1.41	1.29	1.41	1.46	1.43	1.37	1.24
Átlagos cellaátmérő (mm)	<u>1.33</u>								

A vizsgálatok elvégzése után az átlagos cellaátmérő 1.33 mm lett. Az ISO 13314 szabvány alapján [36] a legyártandó próbatestek nagyságát $14.5 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm}$ nagyságúra választottuk meg.

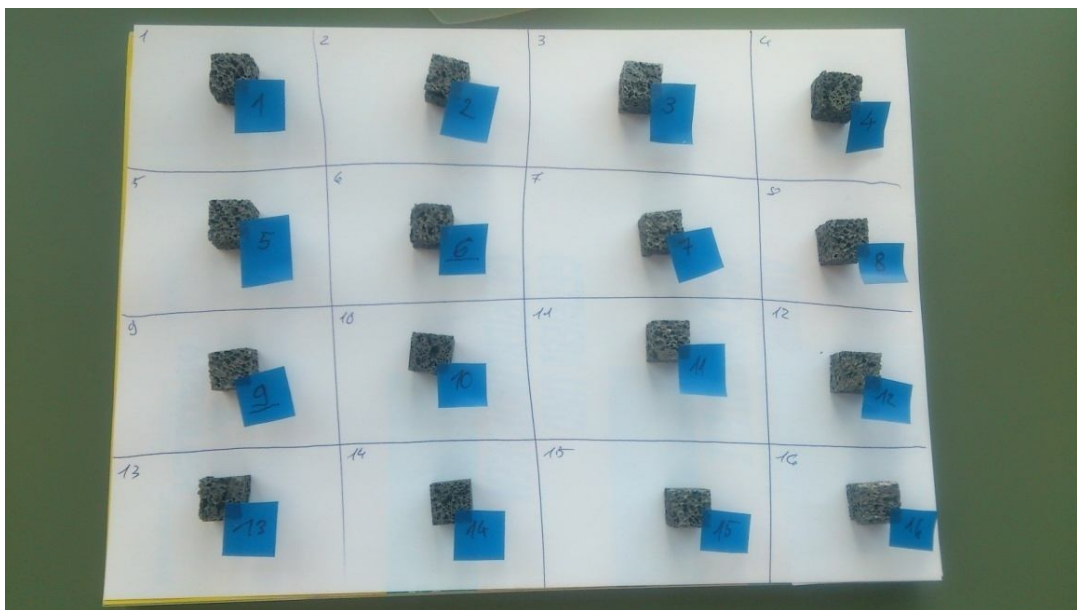
4.2. Fémhab próbatestek méretre vágása

A fémhab próbatesteket a Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Műszaki Menedzsment és Vállalkozási Tanszék Anyagtechnológiai Laboratóriumában vágtuk méretre egy STRUERS Discotom-6 típusú univerzális nagy teljesítményű vágógéppel (23. ábra). A munkadarabot bepozicionáltuk a választott oldalél nagyságának (14,5 mm) megfelelően. Ezt követően a vágást gyémánt korong segítségével végeztük el, automata előtolással. Az elektronikus előtolási sebesség szabályozás révén kiváló vágási eredményeket kaptunk.



23. ábra Fémhab próbatestek méretre vágása [Forrás: saját készítés]

A próbatestek legyártása során törekedtünk arra, hogy a szemközti oldalak párhuzamosak legyenek egymással. Összesen 16 db próbatesteket készítettünk el amelyek a 24. ábra láthatók.



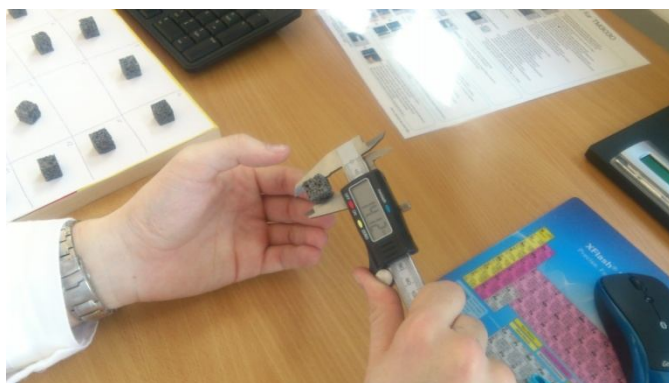
24. ábra Kimunkált próbatestek [Forrás: saját készítés]

4.3. A legyártott próbatestek méreteinek elemzése

A 6. táblázat tartalmazza a legyártott próbatestek oldaléleinek nagyságát. A méréshez egy METRIC típusú digitális tolómérőt használtunk (25. ábra), a mérési eredményeket az 1. melléklet tartalmazza. A mérést minden él mentén, 3 helyen végeztük.

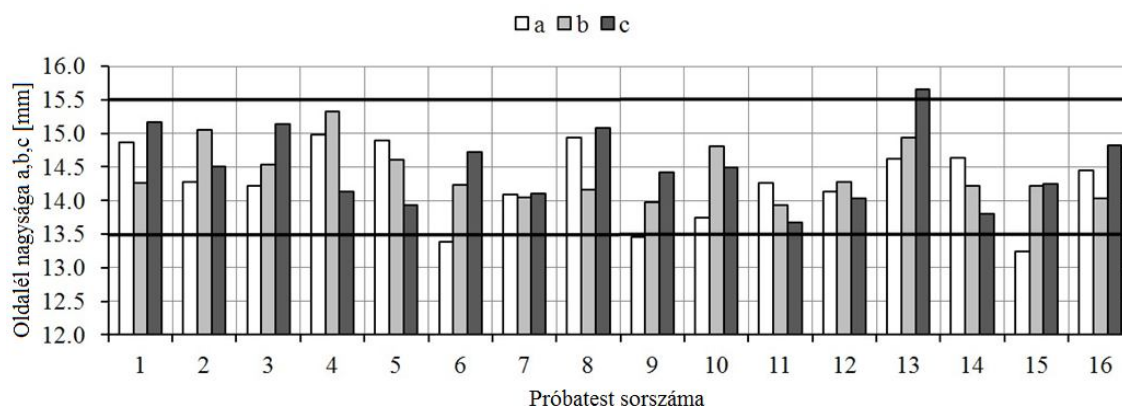
6. táblázat Próbatest oldaléleinek nagysága

Próbatest sorszáma	<i>a</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>c</i> [mm]
1	14.87	14.26	15.17
2	14.28	15.05	14.50
3	14.22	14.53	15.14
4	14.98	15.33	14.14
5	14.89	14.60	13.94
6	13.38	14.24	14.72
7	14.08	14.05	14.10
8	14.93	14.17	15.08
9	13.45	13.98	14.41
10	13.74	14.80	14.49
11	14.26	13.93	13.67
12	14.13	14.27	14.03
13	14.62	14.94	15.66
14	14.64	14.22	13.81
15	13.24	14.22	14.24
16	14.44	14.03	14.82



25. ábra Fémhab próbatest oldalél nagyságának meghatározása [Forrás: saját készítés]

Mivel a vágás során a pontosság nehezen biztosítható, így tűréseket írtunk elő a próbatest méreteire vonatkozóan, 14.5 ± 1 mm. A 26. ábra ábrázolja az oldalélek nagyságát próbatestenként, és ezen jól látható, hogy a 6-os, 9-es 13-as, illetve a 15-ös sorszámú próbatestek nem felelnek meg az általunk várt nagyságnak, így ezeket a további vizsgálatok sokán hanyagoljuk.

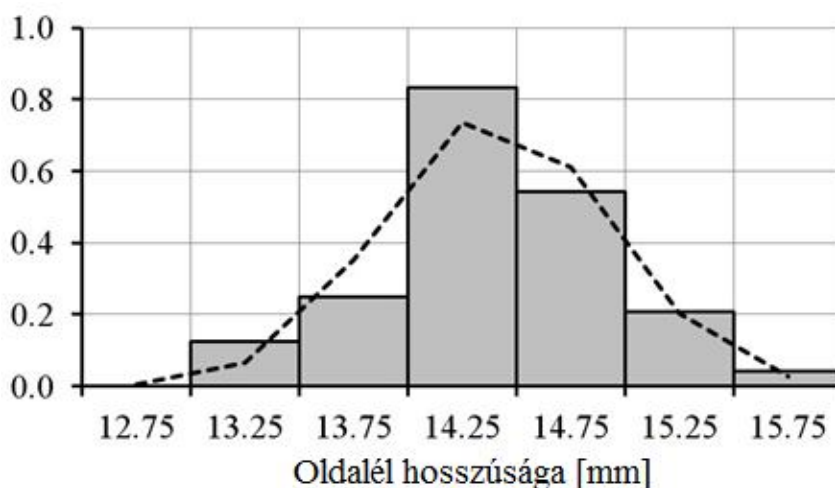


26. ábra Fémhab próbatest méreteinek összehasonlítása [Forrás: saját készítés]

A következőekben a próbatestek oldaléleinek nagyságát, térfogatát, illetve tömegét, statisztikai szempontból vizsgáltuk. A vizsgálat során χ^2 próbát fogunk alkalmazni.

Oldalélek χ^2 próbája:

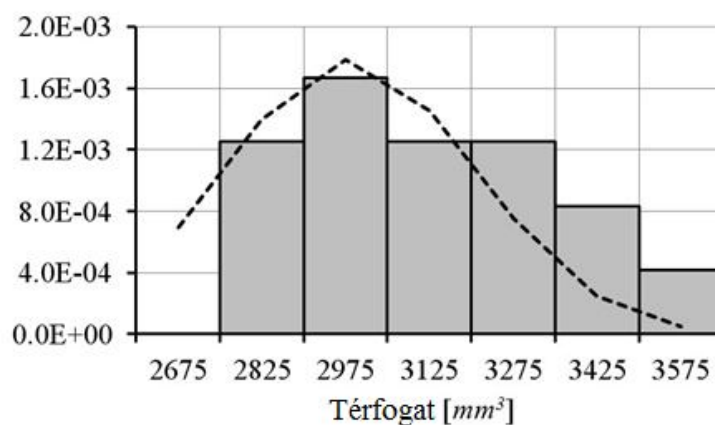
Az oldalélek χ^2 próbájánál 48 elemű minta állt rendelkezésünkre. A próbatestek élhosszai normális eloszlásúak (5%-os szignifikancia szinten $\chi^2 = 2.18 < 7.81 = \chi^2_{\text{kritikus}}$ adódik). Ebből következik, hogy a várt értéke az oldalél nagysága $m = 14.39 \text{ mm}$, illetve ennek szórása $\sigma = 0.52 \text{ mm}$. Az oldalélek hisztogramját a 27. ábrán láthatjuk.



27. ábra Az oldalélek sűrűség hisztogramja [Forrás: saját készítés]

Próbatestek térfogatainak χ^2 próbája:

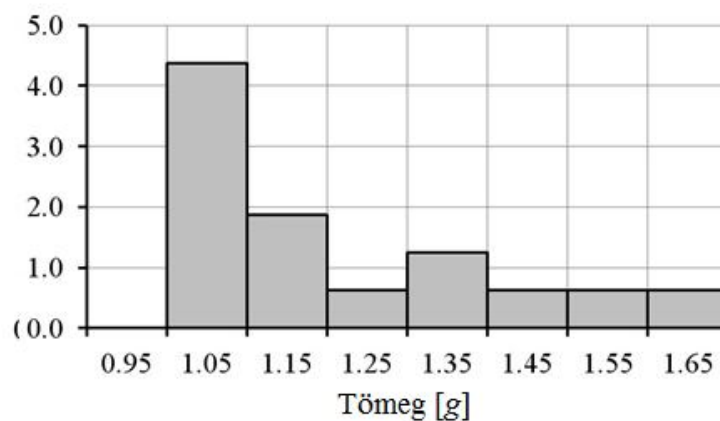
A térfogat eloszlása is normálisnak bizonyult (5%-os szignifikancia szinten a χ^2 próbában $\chi^2 = 1.79 < 7.81 = \chi^2_{\text{kritikus}}$ adódik). A térfogat várt értéke $m = 2982 \text{ mm}^3$, a szórása pedig $\sigma = 223 \text{ mm}^3$. A próbatest térfogat hisztogramját a 28. ábrán láthatjuk.



28. ábra A próbatestek térfogatainak, sűrűség histogramja [Forrás: saját készítés]

Próbatestek tömegeinek χ^2 próbája:

A próbatestek geometriai felépítése miatt (belső szerkezet nem állandó), a próbatestek tömegei nem normális eloszlásúak. Ez abból adódik, hogy a fémhab belső szerkezete inhomogén, mindig más méretű cellákból és más vastagságú falakból épülnek fel. A próbatestek tömegének histogramját a 29. ábrán láthatjuk, a statisztikai elemzés adatait a 2. melléklet tartalmazza.



29. ábra A próbatestek tömeg histogramja [Forrás: saját készítés]

5. FÉM HAB STRUKTÚRA ELEMZÉSE

A következőekben a fémhab próbatestek szerkezeti felépítését (struktúráját) kezdtük el vizsgálni. Ez elengedhetetlen dolog a 3D-s modell felépítéséhez. Elsőnek a fémhab oldalairól makro felvételt készítettünk, majd ezeknek a képeknek felhasználásával meghatároztuk a test V_V térfogatarányát. Az általunk használt két módszer a vonalelemzés (manuális úton) és a térfogatelemzés (szoftver segítségével).

A fémhab próbatestre jellemző térfogatarány mind a területelemzés módszeréből, mind pedig a vonalelemzés eredményeiből származtatásra kerültek. A két módszer által meghatározott mennyiség egymással egyenértékű [37]. A térfogatarányt a következőképpen tudjuk kifejezni,

$$V_V = \frac{V_{cella}}{V_0} \cdot 100 = \frac{V_{cella}}{V_S + V_{cella}} \cdot 100, \quad (1)$$

ahol V_0 a “bulk” alapanyag térfogata, míg V_S a szilárd test fázis a próbatestben.

5.1. Makro felvételek elkészítése

A fémhab oldalairól makro felvételt készítettünk, egy Fujifilm S5700 típusú fényképezőgéppel (30. ábra). Az összes próbatest mind a 6 oldaláról készítettünk fényképet. A 30. ábra láthatunk egy általunk elkészített képet a próbatest oldaláról. Ezt követően a fényképet úgy szerkesztettük, hogy csak a fémhab konkrét oldala látszódjon rajta, tehát a számunkra felesleges részeket levágtuk a képről.

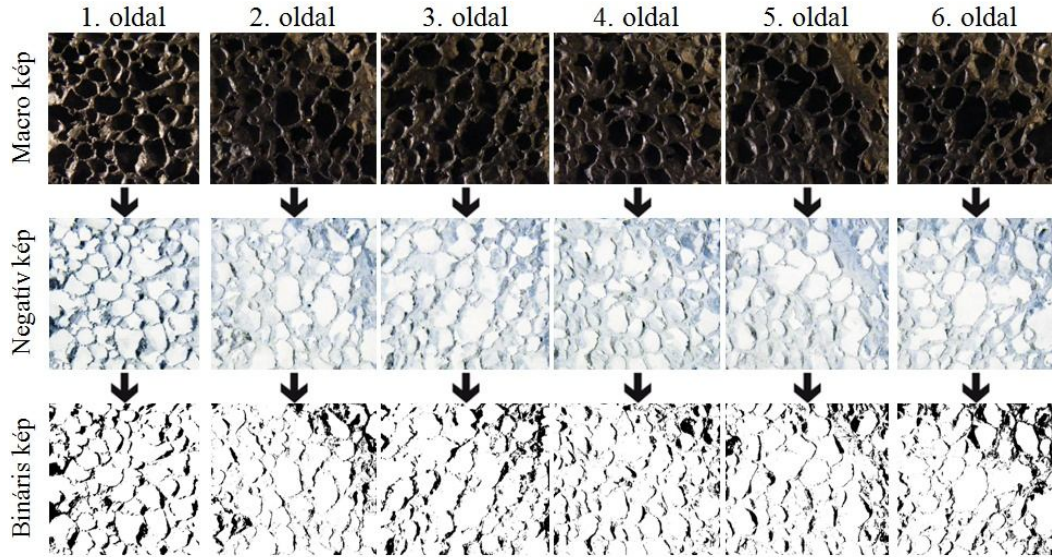


30. ábra A makro felvételek készítésének folyamata és egy elkészített felvétel

[Forrás: saját készítés]

5.2. Területelemzéses vizsgálat

Az általunk készített makro képeket módosítani kellett, hogy későbbiekben az elemző szoftver fel tudja dolgozni, melynek lépéseit a 31. ábra szemlélteti.



31. ábra Makro felvételek szerkesztése, területelemzéshez [Forrás: saját készítés]

Az általunk használt képekről először negatív felvételt készítettünk, majd ezután a képet bináris képként mentettük le, amely teljes egészében csak fekete-fehér pixelekből épül fel. A képelemző szoftver úgy működik, hogy a fekete pixelek számát elosztja az összes pixel számával, és így jön ki a százalékos területarány A_A eloszlása az adott oldalnak. A területelemzés mérési eredményeit a 3. melléklet tartalmazza.

A j -edik felület A_A^j területaránya a következőképpen definiálható,

$$A_A^j = \frac{1}{A_0^j} \sum_{i=1}^n A_{cella,i}^j \cdot 100, j = 1, \dots, 6, \quad (3)$$

ahol A_0^j a j -edik felület területe, n a cellák száma és $A_{cella,i}^j$ az i -edik cella területe a vizsgált síkban. A fémhab átlagos területaránya így

$$\bar{A}_A = \frac{\sum_{j=1}^6 A_A^j}{6}. \quad (4)$$

A [38] publikáció szerint a területelemzéses módszerrel kapott eredmények elméletileg megegyeznek a test térfogatarányával.

5.3. Vonalelemzéses vizsgálat

A következő vizsgálat során vonalelemzéssel becsültük meg a test térfogatarányát. A próbatestek oldalairól készített makro felvételeken hajtottuk vége a vizsgálatot. Az elemzés során, a képen 10 vonalat helyeztünk függőlegesen, illetve vízszintesen, egymástól egyenlő távolságra. Ezeket a vonalakat mértük azt a szakaszt, ahol anyag van a vonal mentén, majd ezeket az értékeket összeadtuk, és elosztottuk az oldalél nagyságával (32. ábra). A vonalelemzéses vizsgálat során a képeket CAD szoftver (AutoCad) segítségével méreteztük be, ezzel garantálva a pontos szakasz nagyság meghatározását. Ezen vizsgálati módszer előnye a pontossága, de óriási hátránya hogy nagyon időigényes, hiszen ezt a módszert kézzel kell elvégezni. A fémhab próbatest egy oldalán végzett vizsgálat körülbelül 30 percet vett igénybe, tehát az összes próbatest összes oldalának kielemezése legalább 48 órát vett igénybe.

A makro felvételre készített vonalhálózás segítségével meghatározhatók a második fázishoz tartozó vonalszakaszok hosszai.

A j -edik felület L_L^j területaránya a következőképpen definiálható,

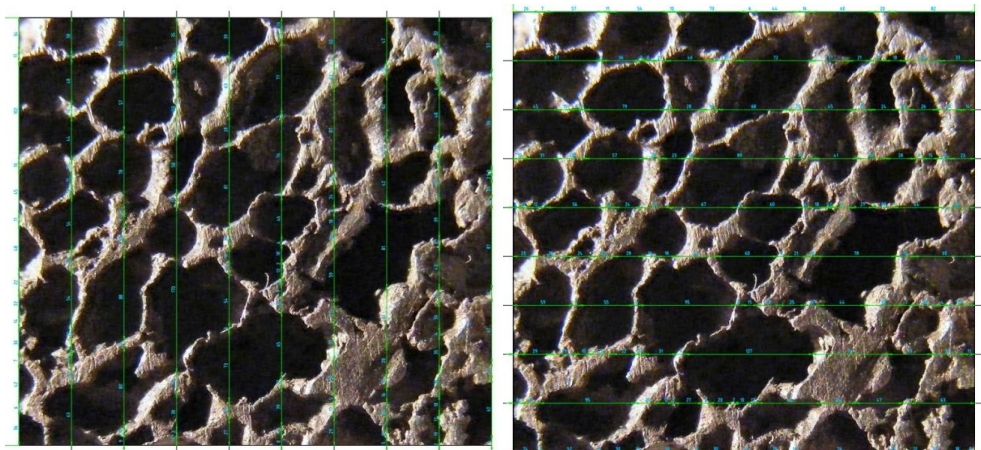
$$L_L^j = \frac{1}{L_0^j} \sum_{i=1}^n L_{cella,i}^j \cdot 100, j = 1, \dots, 6, \quad (5)$$

ahol L_0^j a vonalszakasz teljes hossza a vizsgált j -edik felületen, n a második fázishoz tartozó vonalszakaszok száma, $L_{cella,i}^j$ az i -edik vonalszakasz hossza, amely a második fázison keresztülhalad a vizsgált j -edik felületen.

A fémhab átlagos vonalaránya így

$$\bar{L}_A = \frac{\sum_{j=1}^6 L_L^j}{6}. \quad (6)$$

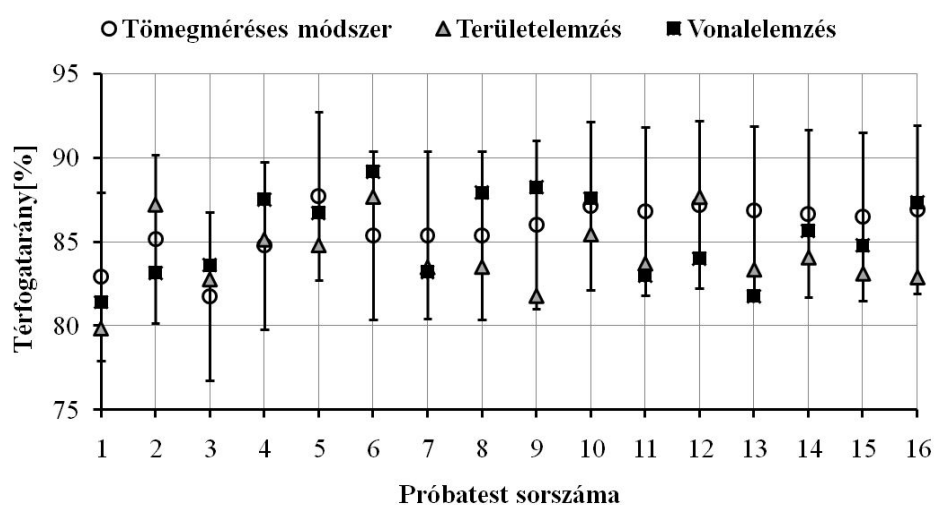
A [39] publikáció szerint a vonalelemzéses módszerrel kapott eredmények elméletileg megegyeznek a test térfogatarányával.



32. ábra Vonalelemzéshez szükséges méretek meghatározása [Forrás: saját készítés]

5.4. A két vizsgálati módszer összehasonlítása

Abban az esetben, ha a fémhab második fázisa a levegő, akkor a térfogatarány meghatározható a test tömegéből (4. melléklet). Ezt a tényt ellenőrzésként felhasználtuk a másik két vizsgálati módszer mellett. A vizsgálati módszerek által meghatározott térfogatarányokat a 33. ábra tartalmazza [41-43].



33. ábra A vizsgálati módszerek összehasonlítása [Forrás: saját készítés]

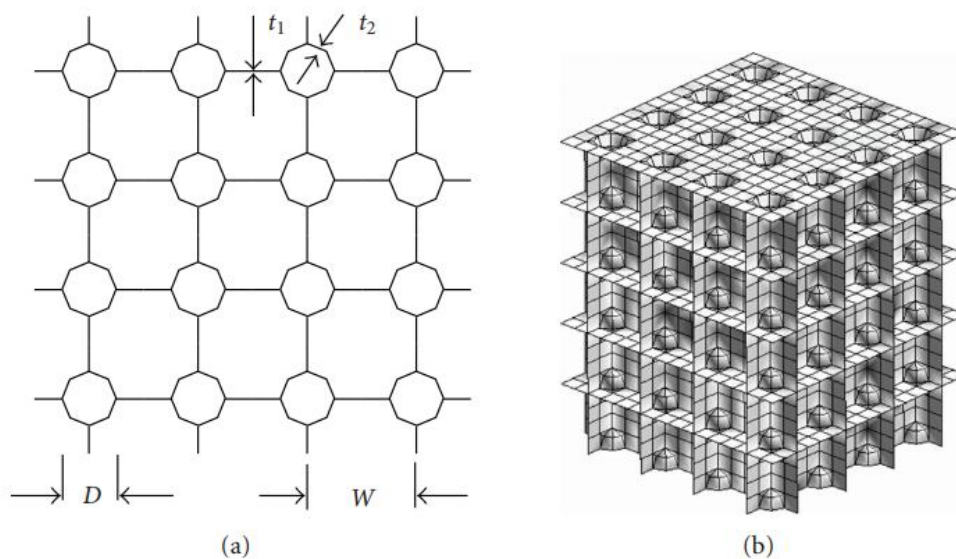
A diagramon jól látható, hogy egyes próbatesteknél a vizsgálati módszerekkel kapott eredmények közel azonosak. Az általunk elkészített két vizsgálati módszer (vonalelemzés és térfogatelemzés) közel megegyeznek a test tömegéből meghatározott térfogatarányra, tehát a vizsgálati eredményeink pontosnak mondhatóak (5. melléklet). Levonható, hogy a területelemzéses módszer pontossága hasonló a vonalelemzéses módszerhez képeset, így az kiértékelés időszükséglete miatt azt célszerű választani.

6. FÉM HAB MODELLEZÉSI LEHETŐSÉGEI

A fémhab modellezésének két lehetősége van. Az egyik az, hogy statisztikai adatokból (átlagos cellaátmérő, térfogatarány, stb.) által felépítünk egy idealizált modellt, a másik lehetőség, hogy a legyártott fémhabról ipari CT felvételeket készítünk, és azt rekonstruáljuk 3D-s modellé. Mindkét eljárásnak van előnye és hátránya is. Az idealizált modell előnye, hogy néhány előre meghatározott adatból képesek vagyunk felépíteni egy modellt (nem szükséges hozzá drága berendezés), de a nagy hátránya az, hogy csak megközelítőleg tudjuk szimulálni a fémhab reakcióját, hiszen ez a 3D-s modell nem teljesen egyezik meg a legyártott próbatesttel. A CT felvételnek nagy előnye, hogy ugyanazt a 3D-s geometriát tudjuk vizsgálni, mint a vizsgált fémhab. Hátrányként sajnos a 3D-s modell készítéséhez szükséges egy ipari CT gép, amely nagyon drága.

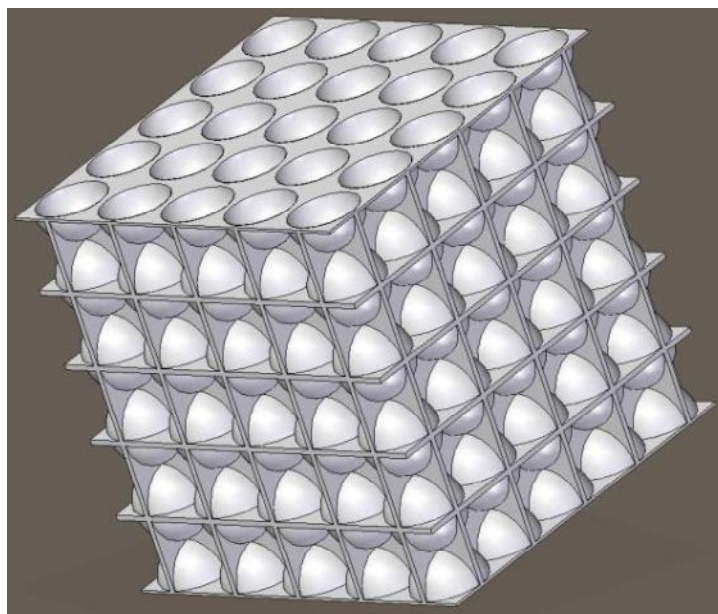
6.1. Idealizált 3D-s modellek és azok tulajdonságai

A 3D-s modell előállításához elengedhetetlen néhány paramétert ismerni az anyagról. Például a fizikai tulajdonságait, relatív sűrűségét. Az előzőekben ezeket a dolgokat meghatároztuk, tehát akár képesek vagyunk a 3D-s modellt felépíteni. Sajnos mivel a fémhabok belső szerkezete nem rendezett és bonyolult ezért szinte teljes részletességében lehetetlen leírni. Ezért egyszerűbb, ha vizsgáljuk a fémhabok egyes tulajdonságait, szerkezeti paraméterek hatását, és leegyszerűsítjük az eredeti szerkezetet. Ezt az egyszerűsített 3D-s modellt nevezzük idealizált modellnek, tehát a belső szerkezete nem teljesen azonos a valós szerkezettel, de a fizikai tulajdonságai, viselkedései megegyeznek a valós adatokkal. Ennek kétféle módja van. Ha leegyszerűsítjük a dimenziószámot, vagy leegyszerűsítjük a belső szerkezetét. Mi az utóbbit építettük fel és vizsgáltuk. Az általunk használt idealizált modell a „Weaker cruciform-stronger-hemisphere” modell, amelynek szerkezeti felépítése a 34. ábra látható.



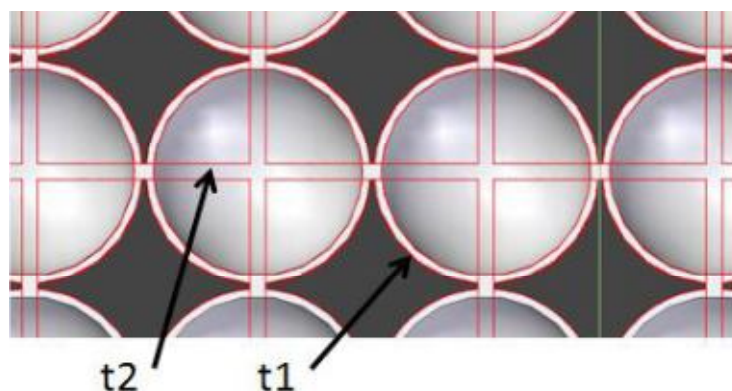
34. ábra Weaker cruciform-stronger-hemisphere modell felépítése [7]

A 3D-s modell felépítéséhez a Solid Edge szoftvert használtunk. A felépített modell a 35. ábra látható. A felépített ábrán 10 db cella helyezkedik el egymás mellett és egy él mentén. Az élek hosszúsága megegyezik a legyártandó próbatest méreteivel.



35. ábra Megépített 3D-s modell Solid Edge szoftverben [Forrás: saját készítés]

Elengedhetetlen dolog hogy összehasonlítsuk a tömeg és a térfogat arányát a próbatestek és a CAD modellek között. A modell felépítése során a t_1/t_2 arányokkal (36. ábra) tudunk közelíteni az általunk mért eredményekhez. A próbatesteken súlyméréssel meghatározott térfogat arány 85,78 %. A modellek felépítése után meghatározott térfogat és térfogatarányokat a 7. táblázat tartalmazza.



36. ábra A t_1 és a t_2 méretek bemutatása a modellben [Forrás: saját készítés]

7. táblázat t_1/t_2 arányok változtatásával meghatározott térfogatarány

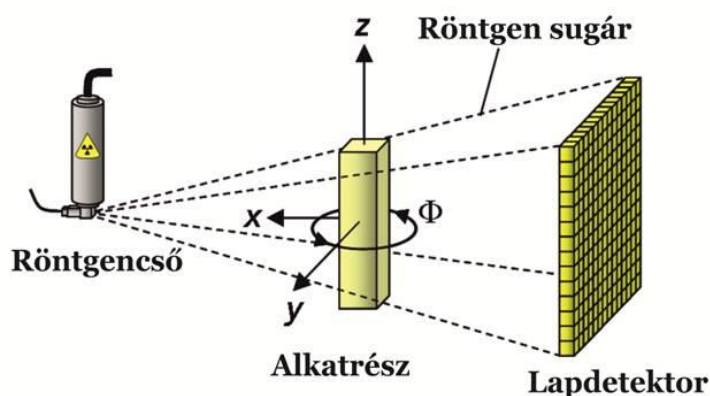
t_1/t_2	Térfogat [mm ³]	Térfogatarány [%]
1	448,32	85,29
2	373,68	87,75
4	336,48	88,96
6	324,072	89,37
8	317.744	89,57
12	311.68	89,78

A térfogat t_1/t_2 arányok változtatásával meghatározott térfogatarányokból jól látszik, hogy az 1-es arányszámmal ellátott próbatest hasonlít legjobban az általunk mért eredményhez, tehát ezentúl ezt a modellt fogjuk használni és vizsgálni.

6.2. Ipari CT felvétel alapján 3D geometria rekonstruálása

Az ipari CT működése

Az ipari CT úgy működik, hogy készít egy 2D-s röntgenfelvételt a vizsgálandó objektumról, majd a tárgyasztal és az azon felfekvő alkatrész egy kis szöggel elfordul. Ez addig ismétlődik, amíg az alkatrész teljesen körbe nem fordul és ez idő alatt minden egyes kis szögelforduláshoz egy röntgenkép készül. A munkadarab ellentétes oldalán elhelyezett detektor érzékeli a különböző intenzitást. A detektor összegyűjti a testen áthaladó röntgensugarakat, és látható fénné konvertálja azokat. A fényt fotódiodák konvertálják elektromos jellé, és a detektor elektronikája ezeket a szinte alig mérhető elektromos jeleket alakítja át digitális jelekké. Az ipari CT készülék elvi működése a 37. ábra is látható.



37. ábra CT működésének bemutatása [40]

Ezek a digitális jelek nagysebességű optikai kábelén keresztül kerülnek a rendszer képfeldolgozó processzorába, amely jelentős számítóteljesítményével valós időben hoz létre nagyfelbontású rekonstrukciós képet [40].

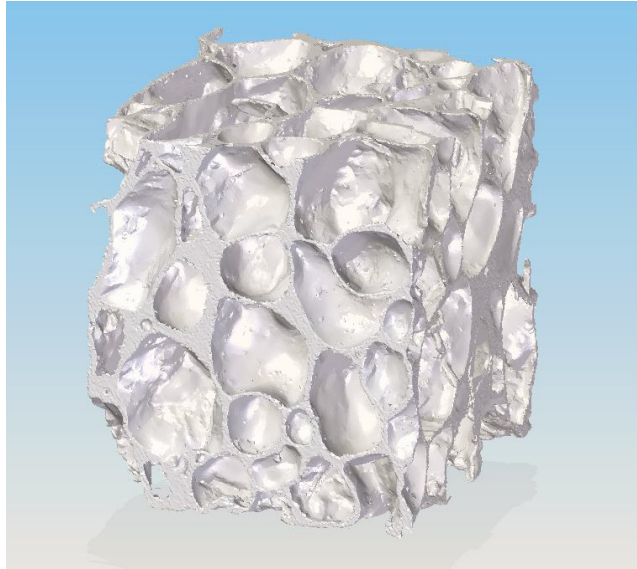
Az ipari CT vizsgálatra a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszékének Anyagvizsgáló Laboratóriumában volt lehetőségünk egy YXILON Modular típusú gépen. A vizsgáló berendezés jellemző paramétereit 8. táblázat tartalmazza.

8. táblázat A gép jellemző paramétereit

Csőfeszültség	170 <i>kV</i>
Csőáram	2,00 <i>mA</i>
Projekciós szám	1280
Detektálás	Flat panel
Felbontás	0,024 <i>mm</i>

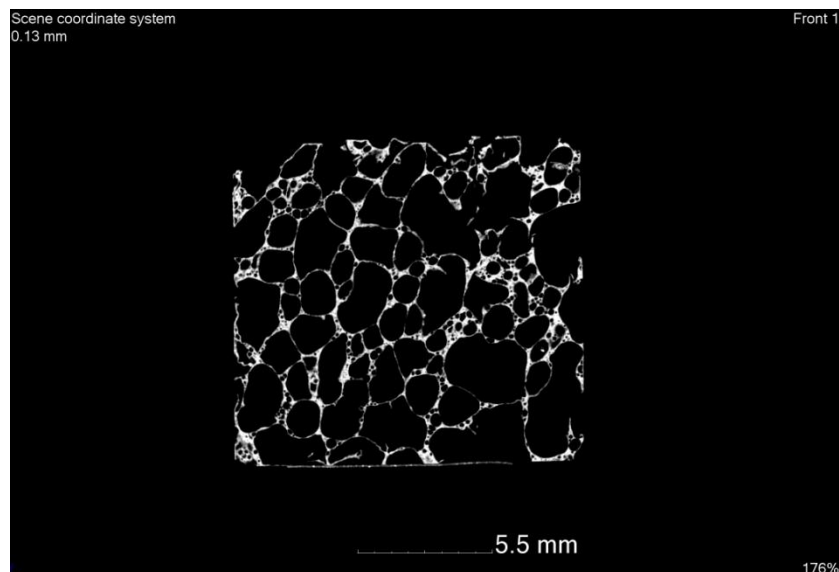
Ipari CT felvétel elemzése

Az ipari CT berendezés segítségével számos információt nyerhetünk ki a próbatesteinkből. Ez az eljárás nagyon hasznos számunkra, hiszen így nemcsak a külső felületét tudjuk vizsgálni a próbatestnek, hanem a belső struktúráját, illetve a belső cellák térfogatát is meg tudjuk határozni. A 38. ábra látható egy 3D-s CT- felvételt, amely a próbatestünkről készült.



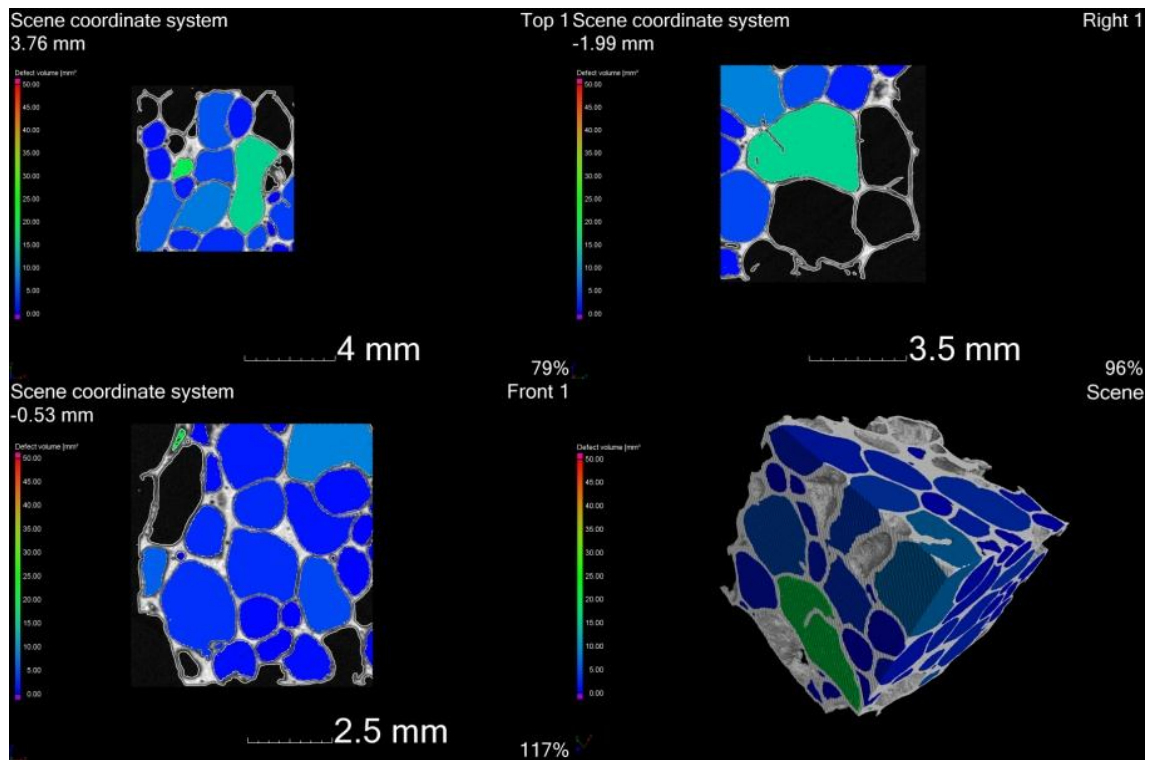
38. ábra CT felvétel az általunk vizsgált próbatestről [Forrás: saját készítés]

A CT- felvételt át tudjuk alakítani olyan módon is, hogy a fémhabunk belső szerkezetének egy tetszőleges 2D-s metszetét láthassuk, egy ilyen felvételt látható a 39. ábra.



39. ábra 2D-s felvétel a próbatest belsejéből [Forrás: saját készítés]

A 3D-s felvétel legnagyobb előnye számunkra, hogy elemezni tudjuk a belső cellák térfogatának nagyságát (40. ábra), amellyel még inkább pontosítani tudjuk az általunk készített idealizált modellt. A belső cellák térfogatának nagyságát ki tudjuk menteni adatbázisba, amelyeken statisztikai vizsgálatokat tudunk végezni.



40. ábra Térfogatelemzés a CT felvételen [Forrás: saját készítés]

A jövőben szeretnénk vizsgálni a belső cellák térfogatát, illetve ezeken a 3D-s modelleken szeretnénk végelem szimulációt is elvégezni. A CT-felvételeket szeretnénk összehasonlítani az idealizált modellünkkel, és hibaelemzést elvégezni rajta.

7. EREDMÉNYEK

A vizsgálataink fő célja az volt, hogy minden olyan tulajdonságát megállapítsuk a fémhabunknak, amelyek szükségesek egy végeelem szimulációs vizsgálathoz. A fémhab alapanyagának vizsgálatain során megbizonyosodtunk arról, hogy a gyártó által közölt adatok megfelelnek az általunk mért eredményeknek. A meghatározott értékekben csak minimális eltérést tapasztalható, így további a vizsgálatok során az általunk mért eredményeket használjuk.

A fémhabról készített mikroszkópos felvételek során meg tudtuk határozni az átlagos cellaátmérőt, amely elengedhetetlen volt a fémhab próbatestek legyártásához, amelyeket a későbbiekben nyomóvizsgálat alá fogunk venni. A nyomóvizsgálat által meghatározott értékekre is szükségünk lesz a végeelem szimuláció validálásához.

A fémhab strukturális vizsgálata során nagyon sok következtetést le tudtunk szűrni a vizsgálati módszerekkel kapcsolatban. Az egyik legfőbb következtetésünk az, hogy a fémhab térfogatarányát viszonylag pontosan meg tudjuk határozni vonalelemzéssel és területelemzéssel egyaránt. Továbbá fontos azt kijelenteni, hogy a területelemzéses módszer is van olyan pontos, mint a vonalelemzéses, tehát nem muszáj annyi időt tölteni a vonalelemzéssel, hisz a másik módszer is van legalább olyan pontos. A térfogat elemzéses módszerrel lehetne legjobban meghatározni a fémhab térfogatarányát, de sajnos ez a vizsgálat nem fejeződött be a dolgozat írásáig. A CT térfogatarányos módszer igaz, hogy a legpontosabb, de sajnos ez nagyon költséges, és nem sok cég, egyetem rendelkezik ilyen géppel, hiszen Közép-Kelet Európában ez az egyetlen ilyen típusú gép.

A 3D-s idealizált modellünkkel is szép eredményt sikerült elérnünk, hiszem az általunk elkészített próbatest térfogata megegyezik a birtokunkban lévő fémhab próbatestek térfogatával.

A jövőbeli terveink között szerepel az, hogy a CT felvételek által meghatározott térfogatarányokat összehasonlítsuk az eddigi vizsgálati eredményekkel. A CT felvételek elkészültével rendelkezésre fognak állni a fémhab próbatestek valós 3D-s modelljei is. Ezt követően szeretnénk összehasonlítani az általunk készített idealizált modelleket az ipari CT felvételekkel, hogy mennyire is hasonlítanak egymásra, és ezeken hibaelemzést végezni.

A CT vizsgálatok befejeztével lehetőségünk lesz a fémhab próbatesteket nyomóvizsgálat alá venni és meghatározni a rugalmassági modulusát. Ezzel a

vizsgálattal be is fejeznénk magának a fémhabnak a vizsgálatát, és ezzel elérve az összes szükséges paramétert a végeelem szimulációhoz.

Ezután fog következni számunkra a legnagyobb feladat, a végeelem szimuláció. Az idealizált modelleket és a CT felvételeket egyaránt szeretnénk vizsgálni végeelemes szoftver segítségével. Számunkra az egyik legnagyobb akadály lehet, hogy a végeelem szimuláció nem fut le a személyi számítógépeken, hiszen olyan sűrű hálóval (kis végeelemekkel) kell dolgozni, hogy egy asztali számítógépnek arra nincsen kapacitása. Ezért szeretnénk majd a végeelem szimulációt a Debreceni Egyetem szuperszámítógépének segítségével elvégezni, mivel ennek a számítógépnek van olyan erőforrása, amely képes lefuttatni ezt a bonyolult műveletet is.

8. BEFEJEZÉS

A fémhabok egyre szélesebb körű alkalmazásának elterjedése ma már nem kérdés. A mi vizsgálataink és céljaink hasznosak abban a tekintetben, hogy minél jobban megismerhessük ezt az anyagot. A kutatás folytatásaként szeretnénk majd összehasonlítani az általunk elkészített 3D-s modelleket az ipari CT-felvételekkel. A vizsgálatunk legfőbb célja az volt, hogy előkészüljünk a fémhab próbatest végeselemes szimulációjára. Ehhez segítségül kívánjuk venni a Debreceni Egyetem szuperszámítógépének erőforrásait.

A fémhabok modellezése nagyon komplex dolog, mivel a fémhab belső szerkezete nem szabályos. A fémhabok végeselem szimulációjával Magyarországon eddig még senki sem próbálkozott, csak külföldi publikációkban közöltek próbálkozásokat, kisebb-nagyobb sikerrel.

A jövőbeli célok eléréséhez megvan a kellő tudás a Debreceni Egyetem Műszaki Karán. Szeretnék köszönetet mondani Gábora Andrásnak, hogy legyártotta a vizsgálati anyagunkat és azt rendelkezésünkre bocsátotta. Dr. Budai Istvánnak is szeretném kifejezni köszönetemet, hogy rendelkezésünkre bocsátotta laborját az anyagvizsgálatokhoz, és megismertette velem az anyagvizsgálatok csodás világát. A területelemzés nem jöhetett volna létre Balogh Gábor segítségével, aki bevezetett a szoftveres képelemzésbe. Manó Sándornak is szeretném kifejezni köszönetemet, akinek segítségével elvégezhattük a nyomóvizsgálatot, és mindig segítette a kutatásunkat annak ellenére, hogy nem a Műszaki Kar oktatója. A CT- felvételek elkészítése nem jöhetett volna létre Kozma István segítségével. Példaértékűen segítette egy másik egyetem kutatóinak munkáját. Társ konzulensemnek is szeretném kifejezni köszönetemet, Dr. Kocsis Imrének, aki matematikai tudásával segítette a vizsgálatok által meghatározott eredmények statisztikai elemzését.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném kifejezni köszönetemet Dr. Mankovits Tamásnak, aki vezényelte a kutatást. A dolgozatom megírása során, mindig segítségemre volt, akármikor is kerestem Őt, akár személyesen, telefonon, vagy e-mailben. Neki köszönhetem azt, hogy megjelent életem első publikációja (angol nyelven) és előadást tarthattam egy nemzetközi konferencián, valamint bepillanthattam a kutatók világába. Segítségével számos ösztöndíj pályázatot nyerhettem el (DETEP, Kari Kiemelt Szakmai és Tudományos Ösztöndíj, Köztársasági Ösztöndíj).

9. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Apáti S., Borbély Gy., Fémhabok gyártástechnológiája TDK dolgozat, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, 2008
- [2] Babcsán N., Innováció az anyagtudományban: Fémhabok, GÉP, LVIII, 8-9 SZÁM, 86-94, 2007
- [3] Kenesei P., Kádár Cs., Rajkovits Zs., Lendvai J., Fémhabok előállításának módszerei, Anyagok világa, II., 2., 2001
- [4] Kádár Cs., Kenesei P., Napjaink korszerű anyagai: A fémhabok, Fizika Szemle, 2008/7-9, p. 279-281.
- [5] Saadatfar, M., Mukherjee, M., Madadi, M., Schröder-Turk, G.E., Garcia-Moreno, F., Schaller, F.M., Hutzler, S., Sheppard, A.P., Banhart, J., Ramamurty, U. (2012), Structure and Deformation Correlation of Closed-cell Aluminium Foam Subject to Uniaxial Compression. *Acta Materialia*, 60(8), 3604-3615.
- [6] Hodge, A.M., Dunand, D.C. (2003), Measurement and Modeling of Creep on Open-cell NiAl Foams. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34(10), 2353-2363.
- [7] Hasan, A. (2010), An Improved Model for FE Modeling and Simulation of Closed Cell Al-Alloy Foams. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 567390, 12 pages, [doi:10.1155/2010/567390](https://doi.org/10.1155/2010/567390)
- [8] Kou, D.P., Li, J.R., Yu, J.L., Cheng, H.F. (2008), Mechanical Behavior of Open-cell Metallic Foams with Dual-size Cellular Structure. *Scripta Materialia*, 59(5), 483-486.
- [9] Filice, L., Gagliardi, F., Umbrello, D. (2009), Simulation of Aluminium Foam Behavior in Compression Tests. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(1), 129-137.
- [10] Miedzinska, D., Niezgoda, T. (2011), Initial Results of the Finite Element Analyses of the Closed Cell Aluminium Foam Microstructure under the Blast Load. *CMM-2011 Computer Methods in Mechanics*, 9-12 May, Warsaw, Poland.
- [11] Gibson, L.J., Asdby, M.F.: *Cellular Solids*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997, 2nd edition.
- [12] Simone, A.E., Gibson, L.J.: Aluminum foams produced by liquid-state processes, *Acta Materialia*, 46(9), 1998, pp. 3109-3123.

- [13] Santosa, S., Wierzbicki, T.: On the Modeling of Crush Behavior of a Closed-cell Aluminum Foam Structure, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(4), 1998, pp. 645-669.
- [14] Meguid, S.A., Cheon, S.S., El-Abbasi, N.: FE Modelling of Deformation Localization in Metallic Foams, *Finite Elements in Analysis and Design*, 38(7), 2002, pp. 631-643.
- [15] Adziman, M.F., Desphande, S., Omiya, M., Inoue, H., Kishimoto, K. (2007), Compressive Deformation in Aluminium Foam Investigated Using a 2D Object Oriented Finite Element Modeling Approach. *Key Engineering Materials*, 353-358, 651-654.
- [16] Jirousek, O., Doktor, T., Kytýr, D., Zlámai, P., Fíla, T., Koudelka, P., Janděšek, I., Vavřík, D. (2013), X-ray and Finite Element Analysis of Deformation Response of Closed-cell Metal Foam Subjected to Compressive Loading. *Journal of Instrumentation*, 8 C02012, [doi:10.1088/1748-0221/8/02/C02012](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/C02012)
- [17] Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G. (2000), *Metal Foams: A Design Guide*. Butterworth-Heinemann.
- [18] Czekanski, A., Attia, M.S., Meguid, S.A., Elbestawi, M.A. (2005), On the Use of a New Cell to Model Geometric Asymmetry of Metallic Foams. *Finite Elements in Analysis and Design*, 41(13), 1327-1340.
- [19] Banhart, J. (2001), *Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams*. *Progress In Materials Science*, 46(6), 559-632.
- [20] Vendra, L.J., Rabiei, A. (2007), Evaluation of Modulus of Elasticity of Composite Metal Foams by Experimental and Numerical Techniques. *Materials Science and Engineering: A*, 527(7-8), 1784-1790.
- [21] Tuncer, N., Arslan, G. (2009), Designing Compressive Properties of Titanium Foams. *Journal of Materials Science*, 44(6), 1477-1484.
- [22] Kádár, Cs., Chmelík, F., Rajkovits, Zs., Lendvai, J. (2004), Acoustic Emission Measurements on Metal Foams. *Journal of Alloys and Compounds*, 378(1-2), 145-150.
- [23] Djebbar, N., Serier, B., Bouiadjra, B.B., Benbarek, S., Draï, A. (2010), Analysis of the Effect of Load Direction on the Stress Distribution in Dental Implant, *Materials&Design*, 31(4), 2097-2101.

- [24] Kashef, S., Asgari, A., Hilditch, T.B., Yan, W., Goel, V.K., Hodgson, P.D. (2010), Fracture Toughness of Titanium Foams for Medical Applications. *Materials Science and Engineering: A*, 527(29-30), 7689-7693.
- [25] Mankovits, T., Tóth, L., Manó, S., Csernátó, Z. (2013), Mechanical Properties of Titanium Foams, a Review. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 10-11 October, Debrecen, Hungary.
- [26] Balogh G., Tóth L., Mankovits T., Manó, S. (2013), Manufacturing technologies of titanium foam review. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 10-11 October, Debrecen, Hungary.
- [27] Manó, S., Tóth L., Mankovits T., Balogh G., Soltész I., Csernátó, Z. (2013), Implants made from metal foams. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 10-11 October, Debrecen, Hungary.
- [28] <http://www.admatis.com/> (Letöltés dátuma: 2014-05-03 20:34)
- [29] <http://ecocatalysis.com/en/articles/aluminafoam.html> (Letöltés dátuma: 2014-05-03 20:52)
- [30] Kientzl, I., Babcsán, N., Imre, B., Szilágyi, A.: Fémhabok; Egyetemi előadás – Nemkonvencionális anyagok
- [31] Steven Ribeiro-Ayeh Finite Element Modelling of the Mechanics of Solid Foam Materials Doctoral Thesis 2005
- [32] <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090038701.pdf> (Letöltés dátuma: 2014.05.03. 19:14)
- [33] <http://www.air-and-space.com/> (Letöltés dátuma: 2014-05-03 20:21)
- [34] Brooks H. Smith Material Characterization and Computational Simulation of Steel Foam for Use in Structural Applications 2012
- [35] Curle, U.A., Ivanchev, L. (2010), Wear of Semi-solid Rheocast SiCp/Al Metal Matrix Composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, 852-856.
- [36] ISO 13314:2011 Mechanical Testing of Metals – Ductility Testing – Compression test for Porous and Cellular Metals.
- [37] Underwood, E.E. (1970), *Quantitative Stereology*. Addison-Wesley Publishing Company.

- [38] Saltykov, S.A. (1974), Stereometrische Metallographie. VEB Verlag, Leipzig.
- [39] Hilliard, J.E. (1968), Measurement of Volume in Volume. Quantitative Microscopy, McGraw-Hill, New York.
- [40] Dorogi G., Papp Sz., Fémkerámia kompozitok CT alapú geometriai rekonstrukciója, TDK dolgozat, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2013
- [41] Varga, T. A., Mankovits, T., Budai, I., Balogh, G., Gábora, A., Kozma, I., Manó, S., Kocsis I. (2014), Structural analysis and its statistical evaluation of closed-cell metal foam. Proceedings of the 2st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 10 October, Debrecen, Hungary.
- [42] Mankovits, T., Budai, I., Balogh, G., Gábora, A., Kozma, I., Varga, T. A., Manó, S., Kocsis I., Tóth, L. (2014), Structural modeling of closed-cell metal foam. Proceedings of the 2st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, 10 October, Debrecen, Hungary.
- [43] Mankovits, T., Budai, I., Balogh, G., Gábora, A., Kozma, I., Varga, T. A., Manó, S., Kocsis I. (2014), Structural analysis and its statistical evaluation of closed-cell metal foam. International Review of Applied Sciences and Engineering, 5(2), 135-143.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Hőker típusú olvasztó kemence	6
2. ábra Előkészítő kemence	6
3. ábra Bekeverő edény	7
4. ábra Titán fogimplantátum.....	9
5. ábra Járműipari alkalmazások	10
6. ábra Egy gépkocsi fémhab karosszéria elemének roncsolódása baleset esetén, illetve egy versenyautó ütközője	10
7. ábra Egy Williams FJ44-3A típusú hajtóműben elhelyezett fémhab hangszigetelés..	11
8. ábra Ariane 5 típusú rakétakúp prototípusa	11
9. ábra Alumínium habból készített emelő szerkezet.....	11
10. ábra Alumínium habból készült táblák	12
11. ábra Alumínium habból harckocsi páncélzata	12
12. ábra A fémhab alapanyagának polírozása és a polírozott munkadarab.....	13
13. ábra Fémhab szárítása.....	14
14. ábra A minta előkészítése és a gépbe helyezett fémhab látható.....	14
15. ábra SiC szemcsék átmérőjének meghatározása	15
16. ábra Alapanyag EDX felvétele.....	16
17. ábra Alapanyag összetételének spektruma.....	16
18. ábra Próbatetek méretre vágása	17
19. ábra Próbatetek	17
20. ábra Fémhab alapanyagának nyomóvizsgálata	18
21. ábra Fémhabok kiválogatása a vizsgálathoz	19
22. ábra A vizsgált próbatest és a x30-es nagyítású mikroszkóp felvétel	20
23. ábra Fémhab próbatetek méretre vágása	21
24. ábra Kimunkált próbatetek	21
25. ábra Fémhab próbatest oldalél nagyságának meghatározása.....	22
26. ábra Fémhab próbatest méreteinek összehasonlítása	23
27. ábra Az oldalélek sűrűség hisztogramja	23
28. ábra A próbatetek térfogatainak, sűrűség hisztogramja	24
29. ábra A próbatetek tömeg hisztogramja	24
30. ábra A makro felvételek készítésének folyamata és egy elkészített felvétel.....	25
31. ábra Makro felvételek szerkesztése, területelemzéshez.....	26

32. ábra Vonalelemzéshez szükséges méretek meghatározása.....	28
33. ábra A vizsgálati módszerek összehasonlítása.....	28
34. ábra Weaker cruciform-stronger-hemisphere modell felépítése	30
35. ábra Megépített 3D-s modell Solid Edge szoftverben.....	30
36. ábra A t_1 és a t_2 méretek bemutatása a modellben	31
37. ábra CT működésének bemutatása	32
38. ábra CT felvétel az általunk vizsgált próbatestről.....	33
39. ábra 2D-s felvétel a próbatest belsejéből.....	33
40. ábra Térfogatelemzés a CT felvételen	34

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat Fémhab gyártásának módszerei	5
2. táblázat Idealizált fémhab modellek	8
3. táblázat Különböző fémhab protézisek	9
4. táblázat Gyártói adatok és mért eredmények összehasonlítása	18
5. táblázat Átlagos cellaátmérők meghatározása	20
6. táblázat Próbatest oldaléleinek nagysága	22
7. táblázat t_1/t_2 arányok változtatásával meghatározott térfogatarány	31
8. táblázat A gép jellemző paraméterei	32

MELLÉKLETEK

1. melléklet	Fémhab próbatestek méreteinek meghatározása
2. melléklet	Fémhab próbatestek méreteinek statisztikai elemzése
3. melléklet	Fémhab területelemzéses vizsgálatának eredményei
4. melléklet	Fémhab tömegarányos vizsgálatának eredményei
5. melléklet	Fémhab térfogatarányos vizsgálatának eredményei