



**DEBRECENI EGYETEM
MŰSZAKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK**

UNIVERSITY OF DEBRECEN
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING

**ZÁRTCELLÁS ALUMÍNIUMHABOK
WEAIRE-PHELAN
EGYSÉGCELLÁKKAL TÖRTÉNŐ
MODELLEZÉSE
SZAKDOLGOZAT**

Debrecen

2023



DEBRECENI EGYETEM
MŰSZAKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK

UNIVERSITY OF DEBRECEN
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING







Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	V
Jelölések jegyzéke	VI
1 Bevezetés.....	1
2 Irodalomkutatás.....	2
2.1 Fémhabok.....	2
2.2 Zártcellás alumíniumhab előállításának módjai	3
2.3 Zártcellás habok geometriai modellezésének lehetőségei	5
3 Anyag és módszer	8
3.1 A vizsgálat tárgyát képző fémhab bemutatása.....	8
3.2 Egységcellából felépített modell.....	9
3.3 Geometriai modell vége-selemes vizsgálata	16
4 Eredmények kiértékelése	26
4.1 Zártcellás alumíniumhab modell	26
4.2 VEM szimuláció eredményeinek kiértékelése.....	31
5 Következtetések	33
6 Összefoglalás.....	35
Irodalomjegyzék.....	37
Ábrajegyzék.....	39

Jelölések jegyzéke

P [%] porozitás

V [mm^3] térfogat

1 Bevezetés

Szakedolgozatom témája a zártcellás alumíniumhabok modellezése. A cellás fémek, például a habosított fémek vonzó anyagot jelentenek a könnyűszerkezetes tervezéshez. Az 1948-ban elsőként feltalált „habszerű fémtömeg” óta többféle fémhabot gyártottak. Habosításra számtalan fém és ötvözet létezik, de az alumíniumhabokat vizsgálták a leginkább és ezek rendelkeznek a legnagyobb piaci potenciállal. Bár különböző gyártási módszerekkel fejlesztettek ki prototípusokat különböző kisüzemekben, az alumíniumhabok forgalomba hozása a mai napig korlátozott [1]. Az alumíniumhabok alacsony sűrűséggel és kiváló hőszigetelő képességgel rendelkeznek. Ennek a két tulajdonságának köszönhetően az iparban rendkívül sokoldalúan fel lehet őket használni, beleértve az építőipart, a járműgyártást és az űrkutatást. Az alumíniumhabok sok előnnyel rendelkeznek. Mivel kis súllyal rendelkeznek, ezért energiát lehet velük megtakarítani, aminek következtében javítják a járművek üzemanyag-hatékonyságát. Ezenkívül nagy szilárdsággal és korrózióállósággal rendelkeznek, ennek köszönhetően ellenállnak a külső környezeti hatásoknak is. Ezért megfelelő választás lehet olyan területeken, ahol fontos a kis súly, a nagy szilárdság és a hosszú élettartam. Feladatom, hogy a Debreceni Egyetem Műszaki Karán található 30 milliméter átmérővel és 30 milliméter magassággal rendelkező zártcellás alumíniumhab hengerről Solid Edge környezetben Weaire-Phelan egységcellákból álló, paraméterezhető CAD modellt hozzak létre, majd a modelltől Ansys végelem-szoftver segítségével végelem szimulációt készítek.

A célkitűzéseim közé tartozik Solid Edge környezetben egy paraméterezhető zártcellás alumíniumhab CAD modelljének létrehozása, illetve annak végelem vizsgálata Ansys szoftverben. Végezetül annak bizonyítása, hogy a készített paraméterezhető modell megfelel a zártcellás fémhabok valós tulajdonságainak.

2 Irodalomkutatás

2.1 Fémhabok

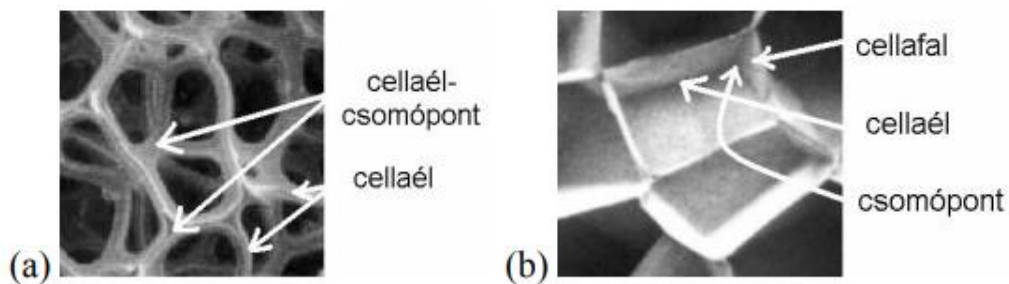
A fémhabok szerkezetüket tekintve hasonlítanak a műanyag habokhoz, ugyanakkor néhány mikrométeres vagy akár centiméteres pórusokat is tartalmazhatnak. A cellák falvastagsága is változhat, és a fémhabok sűrűsége lényegesen kisebb, mint a tömör fémeké. Átlagos sűrűségük a fém sűrűségének akár a századrésze is lehet, például az alumíniumhab az alumínium sűrűségének körülbelül egyharmada vagy annál kevesebb is lehet. Mechanikai, elektromos, akusztikai és kémiai tulajdonságuk nagyban befolyásolja alkalmazásukat. Alakításuk eltér a tömör fémekre jellemző tömörítési, nyomó- és ütéformázástól. Emellett merevek, képlékenyek, jó hővezetők és hőelvezetők. Szerkezetüknek és szilárdságuknak köszönhetően hatékonyan elnyelik az ütési energiát, és alkalmasak magas hőmérsékleten és nagy nyomáson történő szűrésre. Akusztikai tulajdonságaiknak köszönhetően hangelnyelőként és hangszigetelőként is használhatóak [2].

A fémhabokat geometriai szempontból a póruseloszlásuk alapján sztochasztikus vagy szabályos konfigurációban, illetve topológiájuk alapján zárt vagy nyitott cellás habokként lehet értelmezni. A zárt cellás habokat az különbözteti meg a nyitott cellástól, hogy a szomszédos cellákat egy cellafal választja el egymástól, míg a nyitott cellás habokban a cellák egymással összeköttetésben vannak, mivel a cellákat nem választja el semmilyen felület [3].

A zártcellás alumíniumhabok olyan típusú alumíniumhabok, amelyeknél a cellák a habban egymástól el vannak választva zárt cellafalakkal. Ez azt jelenti, hogy a cellák nem tudnak egymáshoz kapcsolódni. Jellemző, hogy jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a nyitott cellás habok. A zártcellás szerkezet lehetővé teszi, hogy a hab sokkal merevebb és ellenállóbb legyen. Ezenkívül jobb hőszigetelő képességgel rendelkeznek, mivel a zártcellás falak csökkentik a hővezetést és az áramlást a fémhabban. Az alumíniumhabok közül a zárt és a nyitott

cellás habok különböző tulajdonsággal rendelkeznek, ezért a választás a konkrét alkalmazási területektől függ [4].

Az alumíniumhab mechanikai tulajdonságai számos tényezőtől függenek, mint például a geometriai paramétereiktől, ami magába foglalja a cellatopológiát, cellaméretet, cellaformát és a cellaeloszlást. Függ még a technológiai hibáktól (nem egyenletes cellaméret és annak eloszlása, cellafalvastagság, törött cellafalak, sűrűségváltozások), valamint a fémhabra alkalmazott terhelés összetettségétől és annak mértékétől [3].



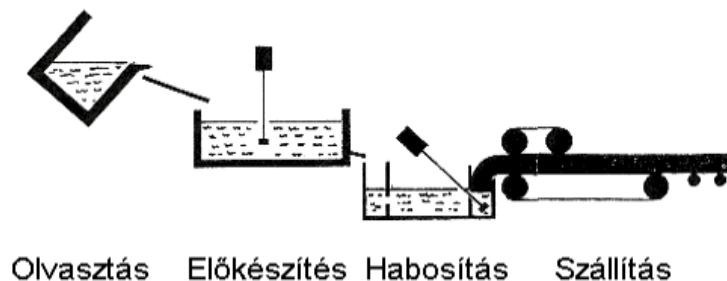
1. ábra: (a) Nyitott és (b) zárt cellák szerkezete [5]

A zárt- és nyíltcellás fémhabok mellett vannak még a szintaktikus fémhabok, amelyek részecskékkel megerősített kompozit anyagok, más néven kompozitok vagy kompozit fémhabok. A szintaktikus szó egy görög eredetű szó, amelynek jelentése szabad fordításban „rendezett”, ez arra utal, hogy az anyagban lévő erősítő vagy a töltőanyag részecskéi többé-kevésbé rendezetten helyezkednek el. A szintaktikus fémhabok, a részecskékkel erősített kompozitok a fémhabok közzé besorolhatóak. Kompozitok lévén a szintaktikus fémhabok összetételét tekintve mátrixanyagból és erősítőanyagból áll, a mátrixanyag általában alumínium, de gyakorlatilag bármilyen fém lehet, az erősítőanyag pedig általában üveg, kerámia vagy fém gömbhéj [6].

2.2 Zártcellás alumíniumhab előállításának módjai

A zártcellás alumíniumhabokat általában három féle módszerrel állítanak elő. Ezek hasonlítanak egymásra, de minimális különbséggel mégis eltérnek egymástól. Az első, amelyet ebben a fejezetben részletezek az a zártcellás alumíniumhab előállítása fúvatóanyaggal, ezt követi a zártcellás alumíniumhab gyártása gázinjektálással, majd a gyártás szilárd-gáz eutektikus megszilárdulással.

Az olvadt fémhez úgynevezett fúvatóanyagot adnak, amely a gázfejlődés során bomlik. Amikor a keveréket a szemcsék bomlási hőmérsékletre melegítik, a felszabaduló gázok buborékokat képeznek, amelyek mozognak és összeilleszkednek. Ez az illeszkedés alakítja a végső szerkezetet. Ennek a szerkezetnek a szilárd állapota a fémhab. Ez a gyártási folyamat azonban nehezen szabályozható, és nem eredményez egységes cellaszerkezetet. A közepén nagy gázbuborékok képződnek, miközben a lehűlt felületek közelében a sűrűség növekszik. A nemkívánatos nagy buborékok és az inhomogén eloszlás leküzdésére több megoldást is bevezettek. A buborékok nagy sebességű keveréssel 10 másodperc alatt egyenletesen eloszthatóak. Az is megfigyelhető volt minden esetben, minél egyenletesebb volt a buborékok eloszlása, annál jobb minőségű volt a keletkezett hab. Fontos paraméter az olvadék viszkozitása is, amit növelni lehet a szerkezet stabilitásának biztosítása érdekében. A buborékok mozgása lelassul, és a magas viszkozitás jelentősen csökkenti a buborékok kiszökését a fémhabból. Az olvadék viszkozitása növelhető ötvözetek vagy viszkozitásnövelő adalékanyagok használatával. Viskozitásfokozók közé tartozik a salak, de használnak gázokat vagy folyadékokat, például levegőt, nitrogént, oxigént, szén-dioxidot, argont vagy vizet is. Az így előállított habokban kisebb üregméretek alakulhatnak ki, de a cellaméretek egyenletesek [7,8].



2. ábra: Habosítási eljárás fúvatóanyaggal egyszerűsített vázlata [7]

A gázinjektálással történő folyamat során szilícium-karbidot, alumínium-oxidot vagy magnézium-oxidot használnak, hogy ezzel növeljék az olvadék viszkozitását, és beállítsák a habképzési tulajdonságokat. Az alapfém alumínium és az erősítő részecskék általában 10-20% térfogattartalommal rendelkeznek, átlagos részecskeméretük pedig 5-10 mikrométer. A habosítási folyamat során gázt fecskendeznek az olvadékba (levegőt, argont, nitrogént) a speciálisan kialakított forgó járókerék vagy a rezgő fúvókák segítségével, amelyek létrehozzák és egyenletesen eloszlatják a gázbuborékokat az olvadékban. Az így keletkezett

buborékok és a fémolvadék keveréke felúszik a folyadék felszínére, ahol a folyékony fém kiáramlásával száraz, viszonylag stabil, folyékony hab képződik. A habot eltávolítják a folyadék felszínéről, majd hagyják lehűlni és megkeményedni [8].

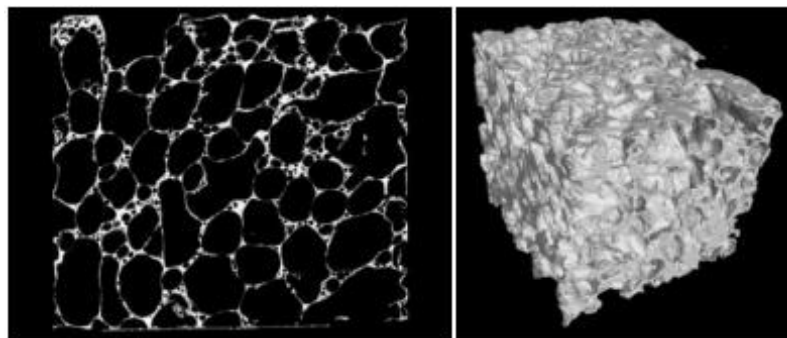
A harmadik módszer a folyékony és a szilárd fémek gázoldékonyságának különbségét használja ki az alumínium habosításában. Először az olvadékot magas nyomáson - akár ez 50 bar nyomás is lehet – gázzal töltik fel, például hidrogénnel vagy nitrogénnel. Ezután a hőmérsékletet a fém olvadáspontja alá csökkentik, és a gáz kicsapódik. Megfelelő körülmények között a gázbuborékok a fémbe záródnak. A keletkező pórusok morfológiáját nagyban befolyásolja a gáz mennyisége, az olvadék feletti nyomás, a hőelvonás iránya és sebessége, valamint az olvadék kémiai összetétele is. Általában a megszilárdulás irányába hosszúkas, nyújtott pórusok alakulnak ki. Ezeknek a pórusoknak az átmérője 10 mikrométer és 10 milliméter között változhat, míg a hosszuk 100 mikrométer és 300 milliméter közzé tehető. A porozitás pedig 5% és 75% között változhat [8].

2.3 Zártcellás habok geometriai modellezésének lehetőségei

Ahhoz, hogy egy geometriai modellt készítsünk a fémhabról alapos ismeretekre van szükség annak belső szerkezetéről. A fémhabok fizikai és mechanikai tulajdonságai közvetlenül kapcsolódnak a fémhab szerkezetéhez és sztochasztikus jellegéhez. Manapság háromféle módszert alkalmaznak a fémhab geometriai modellezésre. Az első a komputertomográf (CT) felvételeiből generált, a második a CT felvételekkel felépített, a harmadik pedig az egységcellákból felépített modell.

A CT felvételekből származó statisztikai adatok alapján létrehozott idealizált modell hasonló viselkedést mutat terhelés hatására, mint az eredeti fémhab. Az idealizált fémhab előnye, hogy az adatok alapján előre meghatározott paraméterek segítségével felépíthető, így gyorsabban és költséghatékonyabban modellezhető a fémhab. Az idealizált modell csak közelítő eredményeket ad, mivel nem teljesen egyezik meg a valóságban létező fémhab geometriájával és belső szerkezetével. Ennek következtében a szimulációk csak megközelítőleg tudják tükrözni a valós fémhab viselkedését terhelés alatt. Az idealizált modellnek az eredetivel való különbségei lehetnek a belső porozitás elhelyezkedésében, a porózumok méretében és alakjában, valamint az összefüggő fémrács szerkezetben. Ezek a különbségek befolyásolhatják a fémhab mechanikai tulajdonságait, például a szilárdságot, merevséget, deformációt [9].

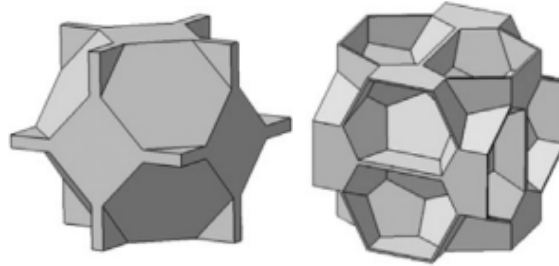
A modellezés következő lehetősége a CT felvételek segítségével felépített geometriai modell. A CT felvételnek számos előnye van, például lehetővé teszi számunkra ugyanazt a 3D-s geometriát vizsgálni, mint fémhab. Ezáltal részletes információt nyújt a fémhab belső szerkezetéről. Azonban fontos megjegyezni, hogy a CT felvételnek és a modellalkotásnak vannak hátrányai is. A gyártástechnológiai sajátosságai miatt a reprodukálhatóság kihívást jelent, így a CT felvételből származó információk csak a vizsgált fémhab szerkezetre vonatkozik. Emiatt a CT alapú modellalkotás és rekonstrukció számos kutatási területet foglal magában, azonban még nem sikerült olyan modellalkotási eljárást kifejleszteni, amely a mindennapi gyakorlatban használható lenne.



3. ábra: CT felvétel és modell [9]

Az utolsó modellezési lehetőség pedig az egyéggcellával történő modellezés. Az egységcella egy rács pontjait átfogó, vektorok által alkotott, ismétlődő egység, amelyet a geometriában, a biológiában, az ásványtanban és a szilárdtestfizikában használnak [10]. Az elnevezés ellenére az egységcella (ellentétben például az egységvektorral) nem feltétlenül rendelkezik egységmérettel, sőt egyáltalán nem is meghatározott méretű. Általában két- és háromdimenziós kristályszerkezet leírásánál használják, de minden dimenzióban van értelme. Fémhaboknál egységcella alatt általában vagy Kelvin-egységcellát vagy Weaire-Phelan egységcellát értünk. Az én feladatom a Weaire-Phelan egységcella használata, ezért a továbbiakban csak ezzel fogok foglalkozni. A Weaire-Phelan szerkezet egy háromdimenziós geometriai szerkezet, amely két egyforma méretű, de különböző alakú buborékokból áll. Denis Weaire és Robert Phelan 1993-ban fedezte fel. Ez az egységcella hatékonyabb megoldást nyújt a Kelvin-problémára. Ez a probléma arra vonatkozik, hogyan lehet a teret minimális felületű és azonos térfogatú cellákra osztani, és a Weaire-Phelan egységcella jobb eredményeket mutatott, mint a korábbi Kelvin-egységcella. A Kelvin-szerkezet celláihoz hasonlóan ezek a cellák kombinatorikailag egyenértékűek a konvex poliéderekkel. Az egyik egy piritóéder, egy szabálytalan dodekaéder ötszögletes oldalakkal, amely tetraédes szimmetriával rendelkezik. A másik egy csonka hatszögletű trapézéder egy

formája, a tetrakaidekaéder egy fajtája, két hatszögletű és tizenkét ötszögletű oldallal. Ebben az esetben csak két tükörsíkkal és forgásirányú szimmetriával rendelkezik. A Weaire-Phelan szerkezet felülete 0,3%-kal kisebb, mint a Kelvin-szerkezeté [11].



4. ábra: Kelvin-egységcella (jobb) és Weaire-Phelan egységcella(bal) CAD modellje [12]

3 Anyag és módszer

3.1 A vizsgálat tárgyát képző fémhab bemutatása

A vizsgált fémhab az ALUHAB nevet viseli, amelyet a felsőzsolcai Aluivent Zrt. gyárt [13]. Az ALUHAB egy innovatív, kivételes tulajdonságokkal rendelkező alumíniumhab, amely az ipari területek széles skáláján alkalmazható. Ez a hab azért különleges, mert szabályozott, homogén cellamérettel, vonzó mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, és összetett formákba önthető anélkül, hogy a hab integritása elveszne. Az ALUHAB-ot nagyon finom méretű alumíniumötvözet felhasználásával gyártják, a szemcseméret általában $3\ \mu\text{m}$ alatti. Ez az ultrafinom szemcseméret nagyon stabil habok előállítását teszi lehetővé. A gyártási folyamat során alkalmazott speciális, magas hőmérsékletű keverési technológia segít megőrizni az ötvözetek stabilitását, ami elengedhetetlen a habosításhoz. A technológia lehetővé teszi a habképződés megfelelő méretű, 0,5 milliméter és 5 milliméter közötti buborékok előállítását. Ez a tulajdonság széleskörű alkalmazási lehetőségeket kínál az alumíniumhabnak. A korábbi technológiákkal ellentétben a buborékok mérete és ezáltal a hab sűrűsége a habosítási folyamat során ugyanazzal az injektorral beállítható és változtatható, ami lehetővé teszi a vegyes cellájú habok előállítását. A fúvóka technológiának köszönhetően a habcellák mérete pontosan beállítható. A buborék minimális mérete a fúvóka átmérőjével megegyező méretű lehet, ezért milliméter alatti buborékok is előállíthatók [14]. A vizsgálataim során az Alumínium 1060 nevű anyagot használtam, mert az alapvetően megtalálható a Solid Edge-ben, illetve az Ansys programban is.



5. ábra: ALUHAB tömb [14]

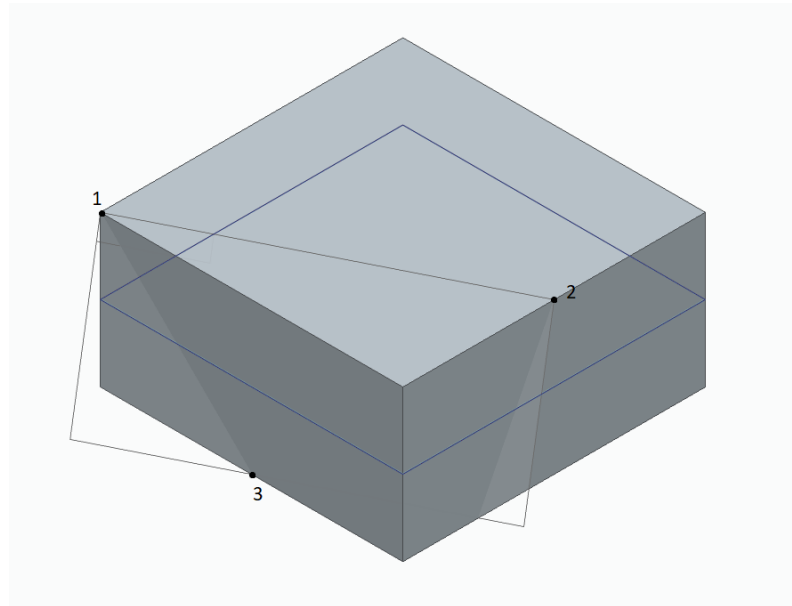
1. táblázat: Alumínium 1060 tulajdonságok Solid Edge anyagablázatból (Forrás: saját készítés)

Tulajdonság neve	Érték
Sűrűség	2712,000 kW/m ³
Hővezetés	0,221 kW/m°C
Fajhő	920,000 J/kg°C
Rugalmassági modulus	68497,570 MPa
Poisson tényező	0,330
Folyáshatár	27,579 MPa
Szakítószilárdság	68,948 MPa

3.2 Egységcellából felépített modell

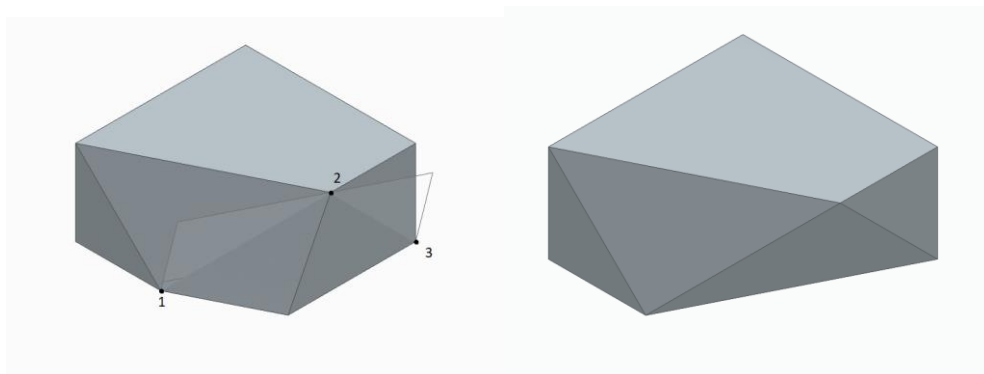
A modell felépítéséhez a Solid Edge 2023 névvel ellátott CAD (Computer Aided Design) szoftvert választottam. Azért esett erre a választásom, mert ezt a tervezőprogramot használom az egyetemi karrierem kezdete óta, illetve az előzetes tapasztalataim alapján arra a megállapításra jutottam, hogy ebben tudom a legjobban megvalósítani az elképzelésemet. A program főbb területei közé tartozik az alkatrész létrehozása, lemezalkatrész tervezése, összeszerelés és a műhelyrajz készítése. A programot a saját laptopomon futtattam, ami egy Asus TUF FX505DT-AL027 típusú laptop. A Solid Edge-ben lehetőség van szimmetrikus vagy hagyományos tervezési mód között választani. Én a hagyományos módban dolgoztam, mert ebben van lehetőség a fémhabot paraméterezni. A legtöbbet használt modellezési menüpontok, amelyeket alkalmaztam: sík létrehozása, kivágás és a tükrözés.

A Weaire-Phelan egységcella elkészítéséhez elsősorban szükségem van Solid Edge ISO Metrikus környezetben, hagyományos módban egy tetrakeidekaédert és egy dodekaédert készíteni. A tetrakeidekaéder elkészítéséhez először is készítettem egy 20 milliméter élhosszúságú négyzetet egy tetszőlegesen kiválasztott síkon. Ezt a négyzetet használtam alapként a további műveletekhez. A következő lépésben a „Kihúzás” parancson belül található „Szimmetrikus kiterjedés” segítségével létrehoztam egy 10 milliméter vastagságú téglatestet. Ezt követően a „Sík 3 pont alapján” -t alkalmazva létrehoztam egy síkot, amelyet a 6.ábra mutat be [15].



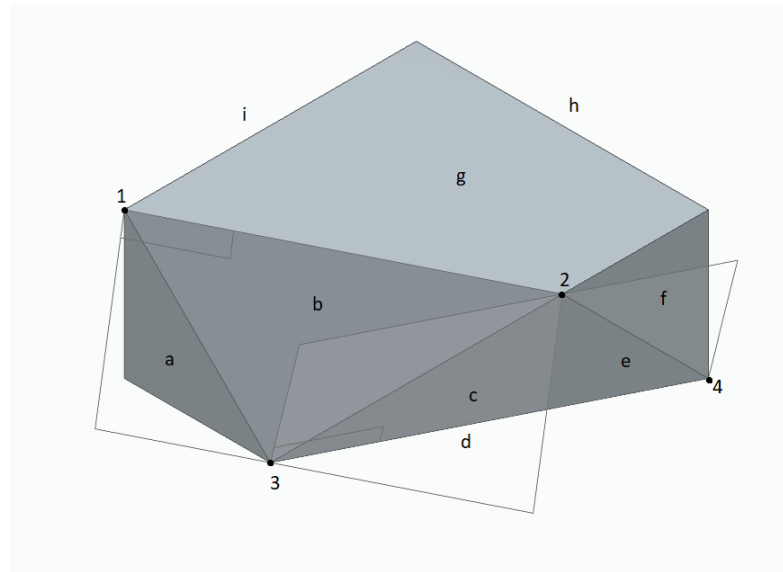
6. ábra: Sík 3 pont alapján (Forrás:[15] alapján saját készítés)

A sík kiválasztása után a sík egy tetszőleges pontján a 6. ábrán látható téglatestnél nagyobb kört készítettem, amellyel a „Kihúzás” paranccsal a téglatest kisebbik részét eltávolítottam. Ezután a „Sík 3 pont alapján” menüpont segítségével újabb síkot készítettem, majd ismét a sík egy tetszőleges pontján készítettem egy a téglatestnél nagyobb kört, ami által a kettészelt téglatest kisebbik részét eltávolítottam [15].



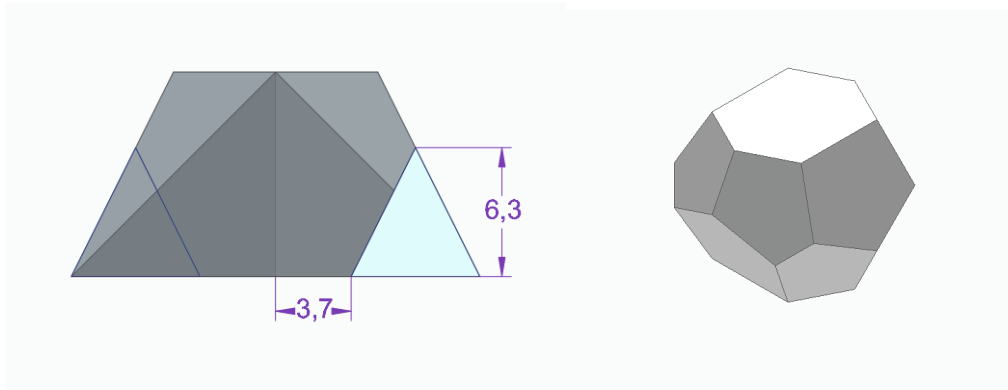
7. ábra: Létrehozott második sík (Forrás:[15] alapján saját készítés)

A következő lépések egyszerű leírása érdekében az eddig elkészített alakzat oldalait betűkkel, a pontjait pedig számokkal jelöltem (8. ábra) [15].



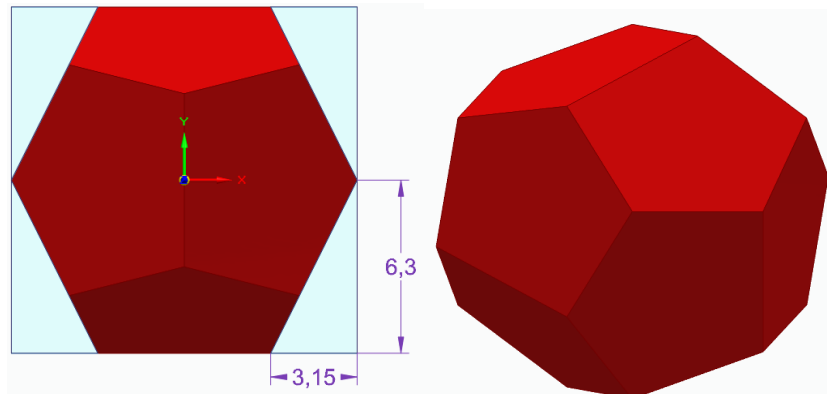
8. ábra: A két létrehozott sík (Forrás:[15] alapján saját készítés)

A következő lépés a tükrözés volt. Először a „Párhuzamos sík” parancsal hoztam létre egy síkot, amely párhuzamos volt az „a” oldallal. Ennek az újonnan létrehozott síknak az egyik pontját a 2-es pontba rögzítettem. Az „Alakelem tükrözés” funkciót alkalmazva ezután tükröztem a „b” és a „c” oldalakat erre a síkra. A következő lépésben ismét egy „Alakelem tükrözés” műveletet végeztem, de most a párhuzamos sík az „i” oldallal volt párhuzamos. Ezt a síkot a 3-as pontba eltolva hoztam létre. Ezen a síkon keresztül tükröztem a „b-c”, illetve az „e-f” oldalakat, tovább finomítva a modelletem. A továbbiakban síkokat hoztam létre, amelyek segítségével a „Kivágás” parancsot alkalmaztam, hogy eltávolítsam a további felesleges részeket a testről. Ezeket a részeket a 9. ábrán látható háromszögekkel vágtam ki, melyek oldala 3,7 milliméterre található a középvonaltól, illetve a magassága pedig 6,3 milliméter. Miután ezt a műveletsorozatot elvégeztem a képen látható síkon és ennek a síknak a merőleges síkján, megkaptam a test kívánt formáját és méretét. Végezetül az „Anyagtáblázat” menüpontban hozzáadtam az Alumínium 1060 nevű anyagot az elkészült modellemhez, hogy meg tudjam határozni a test tulajdonságait (térfogat, felület stb.), illetve a későbbiekben a viselkedését. Ezzel az utolsó lépéssel elkészült a tervezett geometria a szükséges paraméterekkel és anyagminőséggel [15].



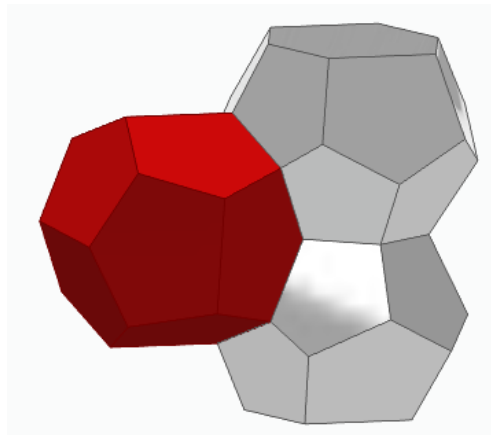
9. ábra: Tetrakaidekaéder (Forrás:[15] alapján saját készítés)

A Weaire-Phelan egységcellához szükség van még egy dodekaéder elkészítésére, amelyet szintén hagyományos módon modelleztem. Az egyszerűbb megértés és szemléltetés érdekében az „Alkatrészfestő” parancs segítségével pirosra festettem a dodekaéder alakzatomat. Az első lépésben egy tetszőleges síkban létrehoztam egy 12,6 mm oldalhosszúságú négyzetet. Ezt a négyzetet a „Kihúzás” menüpontban található „Szimmetrikus kiterjedés” parancs segítségével 12,6 mm-re kihúztam, így létrehozva egy 12,6 mm élhosszúságú kockát. Ezután hasonlóképp cselekedtem, mint a tetrakaidekaéder esetében. A kocka sarkából derékszögű háromszögeket hoztam létre, amelyet a 10. ábra mutat be. A derékszögű háromszög rövidebb befogója 3,15 mm a hosszabbik pedig 6,3 mm. Ezt a művelet elvégezve a kocka mind a négy sarkában, „Kihúzás” paranccsal a háromszögek által közrefogott területeket eltávolítottam. Ezt a műveletsorozatot felülnézetben végeztem, a dodekaéder alakzat érdekében az előbb felsorolt műveletsorozatot meg kell ismételni jobboldali nézetben, illetve előlnézetben is [15]. A fémhab jellegzetes tulajdonságai, amelyek zártcellás szerkezetét kihangsúlyozzák, az üregesség, ezért mindkét alakzatra alkalmaztam „Vékonyfal” parancsot. Ezzel a paranccsal kívántam elérni, hogy a falvastagság megfelelően vékony legyen, és ne kelljen tömör anyaggal dolgoznom. Ezennel a Weaire-Phelan egységcella két elengedhetetlen eleme elkészült. A következő lépés az egységcellák felépítése, illetve az egységcellákból készült henger készítése.



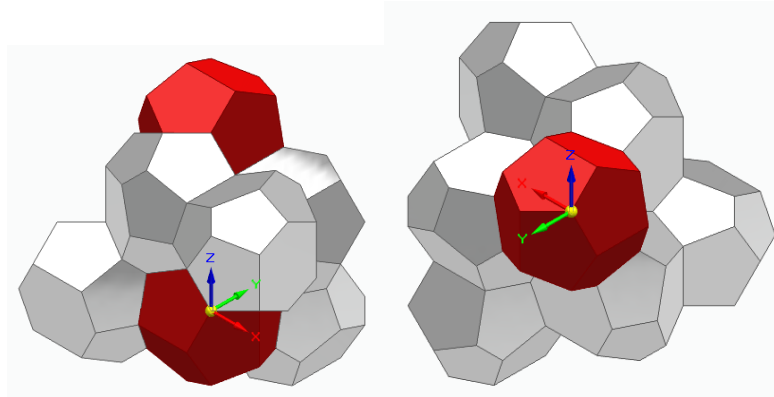
10. ábra: Kivágás háromszögekkel, illetve az elkészült dodekaéder (Forrás:[15] alapján saját készítés)

A folytatásban az eddig használt modellezés környezetet elhagytam és átváltottam a Solid Edge-n belül a szerelés környezetre. Azért tettem, mert ebben a környezetben tudom az elkészült tetrakaidekaédereket és dodekaédereket ütközésmentesen összeilleszteni. Első lépésként beszúrtam két tetrakaidekaédert a szerelés környezetbe, majd először a „Fektet” parancs segítségével egy síkba helyeztem a két tetrakaidekaéder hatszögletű lapjait. Hogy a két lap pontosan, ütközésmentesen kapcsolódjon egymáshoz a „Kapcsolódás” paranccsal összeillesztettem a két alakzatot az azonos pontjuk kiválasztásával. A következő lépésben egy dodekaédert szúrtam be, amit ehhez hasonló módon helyeztem el a szerelésbe. A dodekaéder egyik lapját a „Fektet” paranccsal, illetve „Kapcsolódás” paranccsal a tetrakaidekaéderek ugyanolyan formájú oldalaihoz illesztettem a 11. ábrán látható módon. Itt is nagyon fontos, hogy ütközésmentes legyen az illesztés, mert a későbbiekben egyesítésre lesz szükség, és ha nem ütközésmentes az alakzat hibát fog kiírni [15].



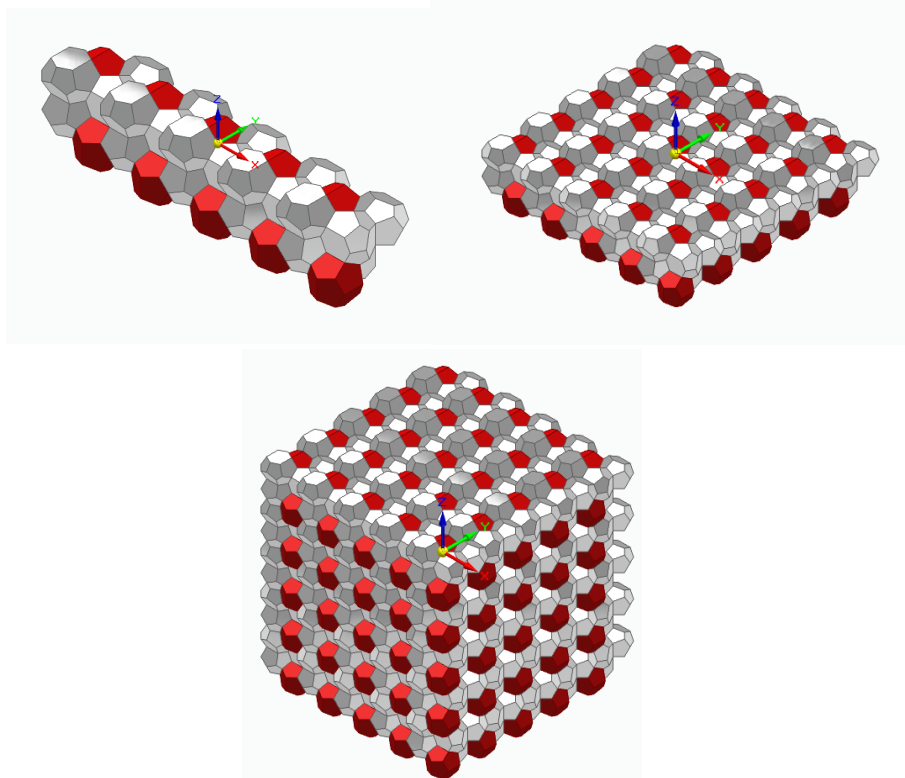
11. ábra: Tetrakaidekaéderek és Dodekaéderek illesztése (Forrás:[15] alapján saját készítés)

Majd ennek a módszernek segítségével a 12. ábrán látható módon a dodekaéderre ráillesztettem még két-két tetraikaidekaédert. Utolsó lépésként szintén „Fektet” és „Kapcsolódás” parancsok segítségével két tetraikaidekaéder közé beillesztettem egy újabb dodekaédert, amely szintén a 12. ábra mutat be [15].



12. ábra: Az általam alkalmazott Weaire-Phelan egységcella (Forrás:[15] alapján saját készítés)

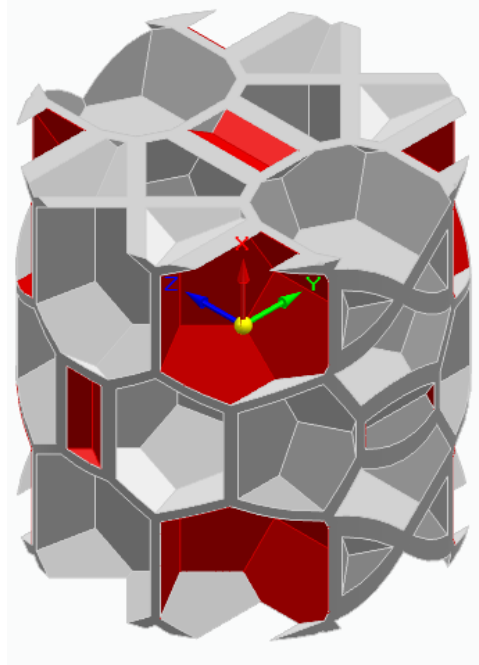
Miután elkészült a Weaire-Phelan egységcella, elkezdtem felépíteni a fémhab modellt. Létrehoztam egy új szerelési környezetet, majd beillesztettem öt példányt az elkészült egységcellából. Ezt az öt egységcellát a 13. ábra bal oldalán látható módon illesztettem össze „Fektet” és „Kapcsolódás” parancsokkal az x tengely mentén. Majd ezt az öt egységcellából álló fémhab darabot a „Mentés másként” paranccsal elmentettem, majd egy új szerelés környezetben beillesztettem ebből az egységcella darabból öt darabot, amelyeket a 13. ábra jobb oldalán látható módon a „Fektet” és „Kapcsolás” parancsokkal az y tengely mentén összekapcsoltam ütközésmentesen. Ezután ugyanezt a folyamatot el kell végezni, mint amit az előzőekben, csak a 25 darab egységcellából álló résszel. Miután mentettem másként a 25 egységcellából álló részt, egy új szerelés környezetbe illesztettem be belőle ötöt, amelyeket szintén összeillesztettem „Fektet” és „Kapcsolás” parancsokkal, csak most a z tengely mentén. Így elkészült egy 125 egységcellából álló alumíniumhab kocka. Ezen a kockán végeztem egy ütközésvizsgálatot, amely kimutatta, hogy nincs ütközés az összeszerelésben, tehát jól végeztem a munkám. Erre azért volt szükség, mert az összeszerelést egyesíteni kell, hogy alkatrészmásolatot tudjak készíteni róla modellezés környezetben, mert a modellezés környezetben egyszerűbben és gyorsabban lehet létrehozni az alumíniumhab hengert. Illetve nagyon fontos még megjegyezni, mivel egy szimmetrikus alumíniumhabra van szükség ezért figyelni kell, hogy a legelső beillesztett egységcella mindig középre essen, mert majd a kivágásnál a szimmetriatengely az x tengely lesz.



13. ábra: 5 darab egységcella (bal), 25 darab egységcellából álló rész (jobb), alumíniumhab kocka (lent) (Forrás: saját készítés)

Miután alkatrészmodellt készítettem az alumíniumhab kockáról az z-y bázis referenciasíkra a „Vázlat” paranccsal szerkesztettem egy 30 mm nagyságú, illetve egy 200 mm nagyságú kört, amelyeknek a középpontja az „x” tengely zéruspontja volt. Következő lépésként a „Kivágás” paranccsal a két kör közötti terület kivágtam a „Kivágás” parancson belüli „Szimmetrikus kiterjedés” funkcióval. Azért volt szükség 200 mm nagyságú körre, mivel paraméterezéskor ahogy változtatjuk az egységcellák méreteit, ennek következtében a térfogatuk nagyobb lesz, és hogy ekkora térfogat mellett is kivágott területként kezelje a Solid Edge a kivágott egységcellákat. A következőkben az előbb készített síkkal egy merőleges síkot hoztam létre a „Merőleges sík” paranccsal. A sík létrehozása után a koordináta-rendszer zéruspontjától az „x” tengely mentén pozitív, illetve negatív irányba rajzoltam egy-egy 15 mm hosszú egyenest, majd készítettem mindkét oldalra egy-egy 100 mm magas és 50 mm széles téglalapot, amely az egyeneshez a téglalap hosszabbik oldalának középpontjával csatlakozott. Mint az előbbieken is szintén a „Kivágás” parancsnak a „Szimmetrikus kiterjedés” funkciójával vágtam ki. A téglalapok mérete összefügg a fentiekben említett paraméterezés következményével. Ennek a lépésnek a befejeztével elkészült a paraméterezhető

alumíniumhab, amelynek méreteit „Test skálázás” és a „Vékonyfal” parancsokkal tudjuk változtatni.



14. ábra: Paraméterezzhető alumíniumhab (Forrás: saját készítés)

3.3 Geometriai modell végelelemes vizsgálata

Annak érdekében, hogy bizonyítani tudjam az általam készített fémhab hitelességét, szükséges megvizsgálnom, hogyan viselkedik a zártcellás alumíniumhabokhoz képest. Ezt a vizsgálatot általában végelelemes szimulációval (VEM) végzik, mivel ez a módszer lehetővé teszi a különböző deformációk, megtámasztások, megnyúlások és terhelések látványos szemléltetését. Az egyetemi tanulmányaim során már részt vettem ilyen jellegű vizsgálatokban, de a számítógépem nem volt alkalmas ezekre a feladatokra, így az egyetem egy erre a célra vásárolt számítógépét használtam. A továbbiakban az Ansys szoftvert használtam, amely segítségével végelelemes módszerrel két különböző porozitású fémhabmodellt vizsgáltam meg. Ennek a vizsgálatnak a célja az volt, hogy bizonyítsam az általam készített modell fémhabjellegét. Ezen vizsgálatok során arra koncentráltam, hogy az egyes fémhabmodellek hogyan viselkedtek terhelés hatására, és hogy milyen különbségek mutatkoztak a különböző porozitású habok

között. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az általam készített fémhab mennyire hasonlít a zártcellás alumíniumhabokhoz. Ezen kutatások és vizsgálatok során megismertem a fémhabok viselkedését és tulajdonságait, és bebizonyítottam, hogy az általam készített fémhab megfelel a zártcellás alumíniumhab jellegének. A szoftver kiválasztása sem volt egy egyszerű feladat, mivel eredetileg a Siemens által fejlesztett Simcenter Femap szoftvert szerettem volna használni a szakdolgozat során, azonban hamar kiderült, hogy a test bonyolultsága miatt a program nem volt képes megfelelően behálózni azt, és mindig 6031-es hibakódot írt ki. Annak érdekében, hogy kiderítsem, mi okozza a problémát a Solid Edge-ben elérhető „Geometriai ellenőr” funkciót használtam. Ez a funkció segít azonosítani azokat az éleket és felületeket, amelyek gátolják a megfelelő behálózást. A „Geometriai ellenőr” futtatása után világossá vált, hogy a modellben rengeteg kis él, kis felület, illetve szalagfelület található. Ezután elkezdtem kutatni az interneten alternatív megoldásokat, és rátaláltam az Ansys szoftverre. A nagy előnye ennek a szoftvernek az, hogy tartalmaz egy olyan alkalmazást, amit Space Claim-nek neveznek. Ez az eszköz lehetővé tette számomra, hogy alaposan megtisztítsam a modellt ezektől a kis élektől és felületektől, amelyek akadályozták a behálózást. Ezáltal jelentősen javítottam a modell geometriáján. Mindezek alapján elmondhatom, hogy kezdetben nem volt egyszerű megtalálni a megfelelő szoftvert, végül az Ansys és a Space Claim alkalmazás segített megtisztítani és optimalizálni a modell geometriáját.

Mielőtt elkezdeném részletezni a végelemes vizsgálat folyamatát, szeretném kihangsúlyozni annak a fontosságát, hogy az alumíniumhab tengelyszimmetriája azért fontos, mert ennek a szimmetriának köszönhetően lehet egyszerűsíteni a modellt, ami pedig előnyös a végelemes vizsgálat során. Az egyszerűsített modell használata nem csak leegyszerűsíti a számításokat, hanem jelentősen csökkenti a háló generálásának idejét, illetve a szimuláció ideje is rövidebb ideig tart. Emellett kiemelendő, hogy a vizsgálat végső eredményeit vissza kell vetíteni a teljes 30 milliméter magasságú és 30 milliméter átmérőjű alumíniumhab henger teljes terjedelmére. Ez azért fontos mert a szimuláció során a test negyedét vizsgálom, de a valósághoz való pontosabb közelítés érdekében az eredményeket a teljes hengerre kell visszavetíteni, hogy megkapjam a teljes testre ható erő mértékét.

Arra a megállapításra jütöttünk, hogy két eltérő porozitású fémhabot vizsgáljak, egy 30-60% közöttit, illetve egy 60-90% közöttit. A porozitás a szilárd anyagok térkitöltési viszonyát jellemzi. A szilárd anyagokban található üregeket általában gáz vagy folyadék (például levegő vagy víz), pórusnak, hézagnak vagy üregnek nevezik [16]. Mivel egy paraméterezhető alumíniumhabot hoztam létre ezért

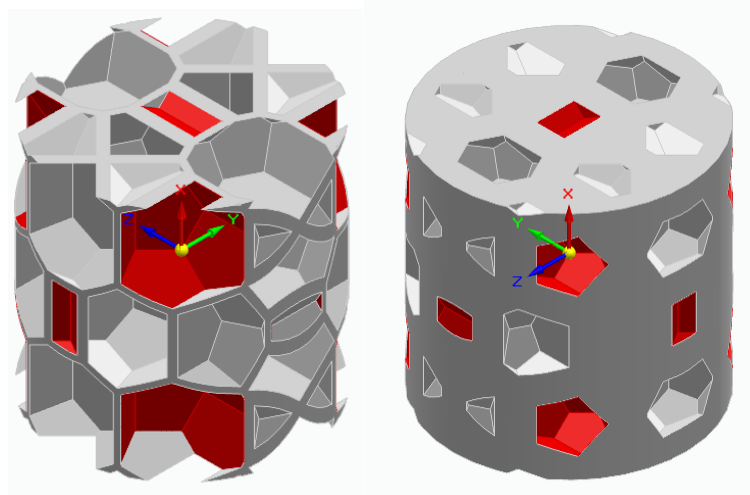
egyszerűen létre tudtam hozni az intervallumokon belüli porozitást a fémhaboknál. A két fémhab porozitása 82%, illetve 30%, amelyet az alábbi módon számoltam ki:

$$P(\%) = \frac{V_{HENGGER} - V_{HAB}}{V_{HENGGER}} \cdot 100 \quad (1)$$

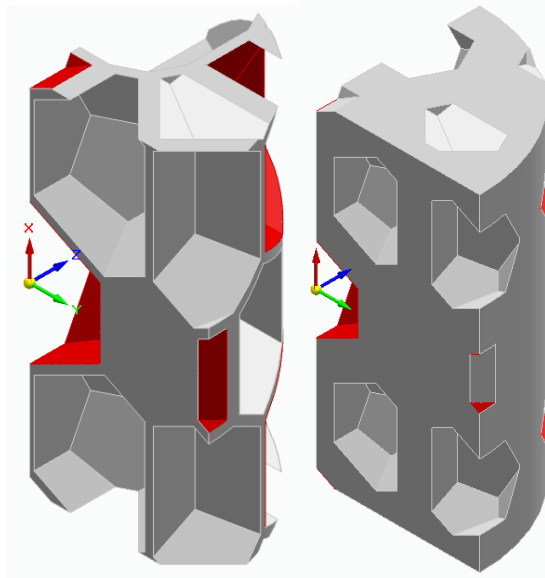
A Solid Edge-n belül a „Vizsgálat” fülnél van egy „Tulajdonságok” menüpont, ahol megtekinthetőek a fémhabok fizikai jellemzői. Ennek a segítségével könnyen ki tudtam olvasni az egyes testek térfogatát, ami után csak egyszerűen be kellett helyettesítenem az egyes térfogatokat a képletbe.

2. táblázat: Vizsgált modellek térfogata és porozitása (Forrás: saját készítés)

	1.Modell (V_{HAB1})	2.Modell (V_{HAB2})	Tömör henger ($V_{HENGGER}$)
Térfogat [mm^3]	3647,398	14760,155	21205,75
Porozitás [%]	82	30	0
Vékonyfal [mm]	0,36	1,62	0
Test skála	1	0,9	1

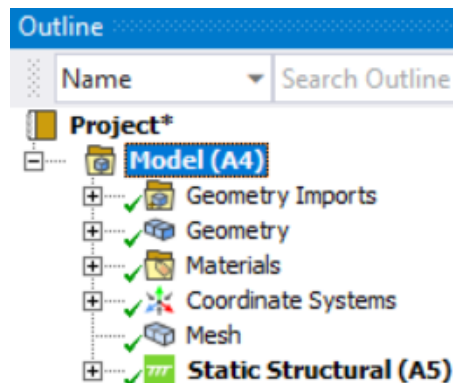


15. ábra: Magas (bal), illetve alacsony (jobb) porozitású fémhab modell (Forrás: saját készítés)



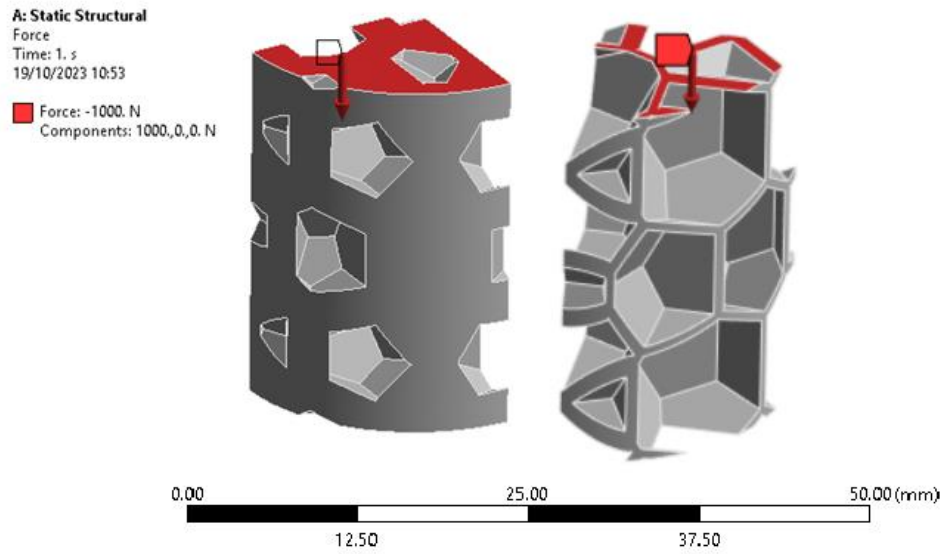
16. ábra: A fémhabok negyed részei (Forrás: saját készítés)

A végelelemes szimuláció során elengedhetetlen volt a test tisztítása a felesleges kis élektől, felületektől, illetve szalagfelületektől. Az Ansys Workbench megnyitása után a „Toolbox” menüben, azon belül is az „Analysis System” részlegben található „Static Structural” analízis rendszert választottam ki. Miután sikeresen megnyitottam a kiválasztott analízis rendszert, a „Project Schematic” ablakban egy hétsoros táblázat jelenik meg. Ebben a táblázatban az „Engineering Data” alapértelmezetten ki van pipálva, azonban a cél az, hogy minden sorban a kérdőjeleket pipa váltsa fel. A táblázat harmadik sorában található „Geometry” menüpontra kétszer kattintva az Ansys Workbench megnyitja a Discovery alkalmazást, ahová be kellett táplálnom az általam készített geometriát, amelyet az „Insert Geometry” paranccsal tudtam megtenni, miután a fájlkezelőből kiválasztottam a szükséges fájlt. Ezután a Discovery alkalmazásban további dolgom nem volt ezért bezártam, majd visszatértem a „Geometry” menüpontra. Jobb klikkel kattintva szintén a „Geometry” pontra a „New Space Claim Geometry” menüponttal megnyitottam a Space Claim alkalmazásban már a Discoverybe betáplált geometriámat. Itt a „Prepare” és a „Repair” fülken található „Extra edges”, „Inexact edges” és a „Short edges” menüpontokkal sikeresen el tudtam távolítani a hátráltató tényezőket a geometriáról. Ezzel végezve áttérhettem a táblázat negyedik sorára a „Model” menüpontra. Erre rákattintva megjelenik a Mechanic alkalmazás, amiben a táblázat hátralévő pontjait meg tudtam csinálni, tehát a kérdőjelek helyett pipák jelentek meg. A Mechanic-on belül az Outline tree-n (17. ábra) haladva készítettem fel a modelletem a végelelem vizsgálatra.



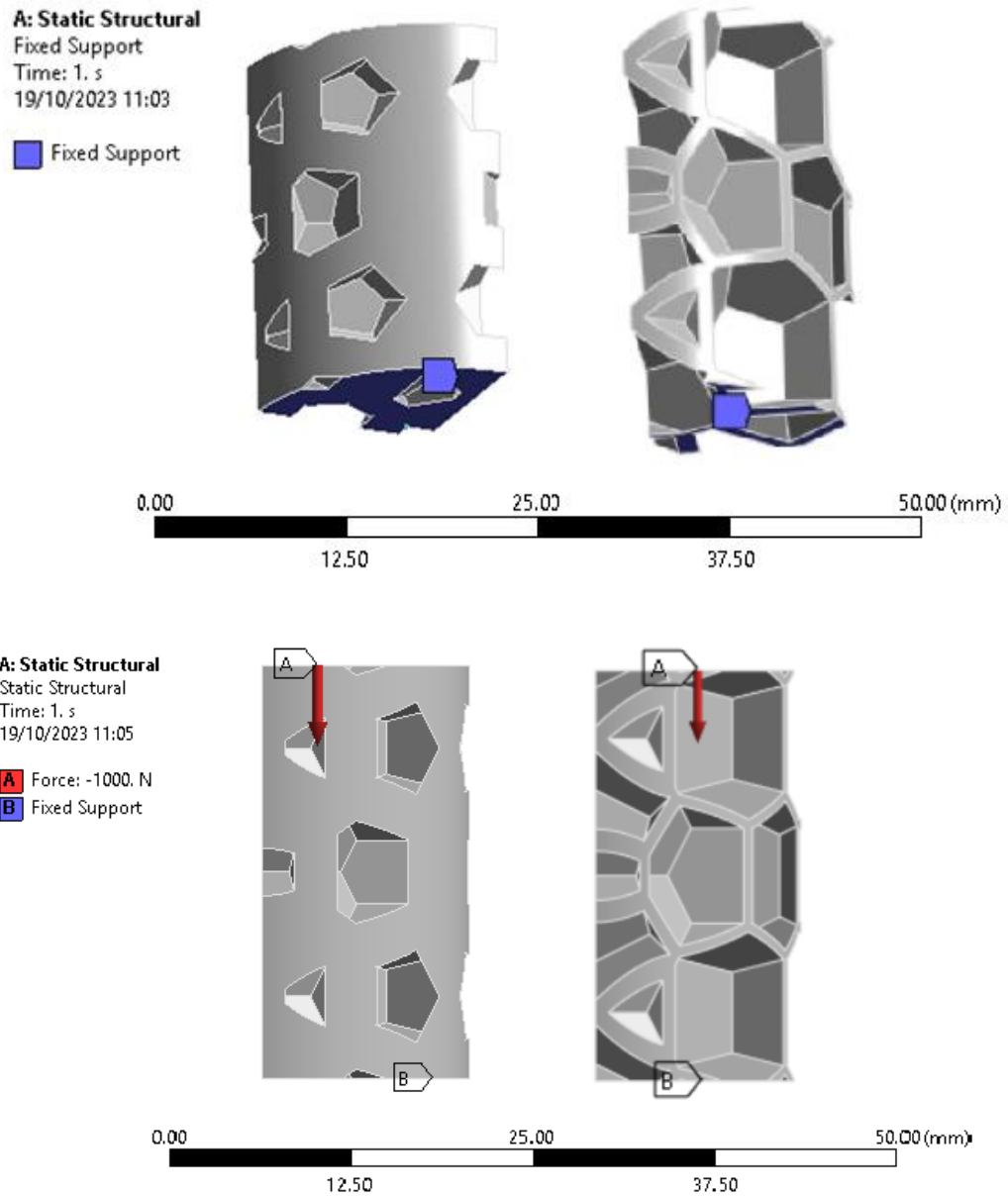
17. ábra: Outline tree

A Space Claim programnak köszönhetően a testek ideálisak és felkészültek a végelem vizsgálatra, ezért a „Geometry Imports”, „Geometry” és a „Coordinate Systems” pontoknál nem kellett semmilyen módosítást végrehajtanom. A „Materials” pontban az alapértelmezett szerkezeti acél anyagot azonban már cserélnem kellett az általam preferált anyagra, az Alumínium 1060-ra. Mielőtt a hálózásra és a halóanalízisre tértem volna át, a modellhez hozzá kellett adni még egy megfogást, illetve egy terhelést. Ezeket a műveleteket a „Static Structural” ponton végeztem, ahol a jobb kattintás után az „Insert” menüpontot választottam. Első lépésként a „Force” lehetőséget választottam ki, majd a henger negyed felszínét jelöltem ki. Ahogy az ábra is mutatja, a terhelést negatív x irányba alkalmaztam, mivel nyomásra szeretném vizsgálni a habot, és ezt 1000 N erővel tettem meg.



18. ábra: Erő hozzáadása Ansys szoftverben (Forrás: saját készítés)

Ezt követően ugyanezen az „Insert” menüponton belül választottam ki a „Fixed Support” lehetőséget, és ezzel rögzítettem a negyed alumíniumhab alját. Ez a lépés biztosította a modell számára a megfelelő megtámasztást.



19. ábra: Megfogások Ansys szoftverben (felül), erők és megfogások Ansys szoftverben (alul) (Forrás: saját készítés)

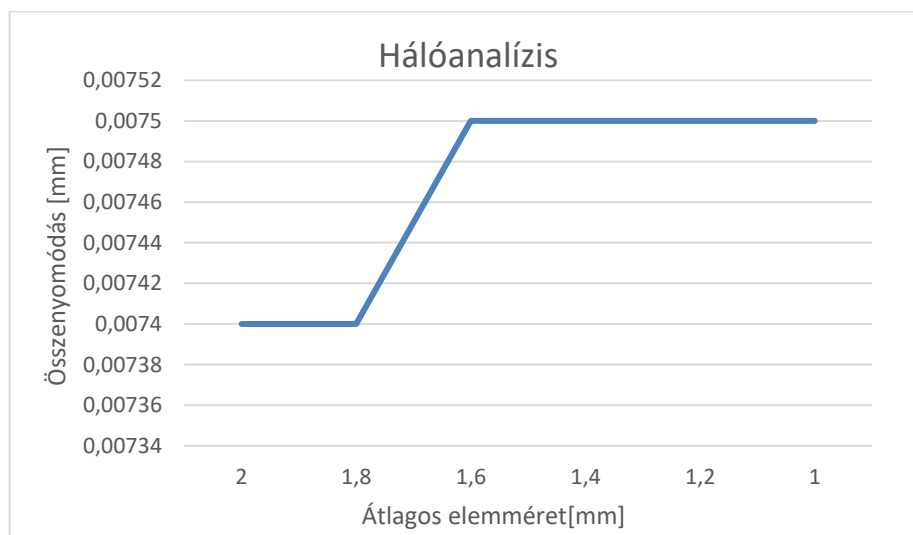
A megfelelő hálósűrűség fontos szerepet játszik az eredményes vizsgálatok során, így elvégeztem egy hálóanalízist. A hálóanalízis két fő oszlopból épül fel: az egyikben megtalálhatóak az elemméretek, amelyeket az analízis során alkalmaztam, míg a másik oszlopban a vizsgált paraméterek szerepelnek, amelyek lehetnek elmozdulás, erő vagy feszültség. Ebben a konkrét esetben az elmozdulás

paraméterre volt nekem szükségem. A következő táblázat az elkészült hálóanalízist mutatja, meg az általam készített alumíniumhab negyedére vetítve, hiszen így a vizsgálat gyorsabban futott le, mintha az egész henger vizsgálata során.

3. táblázat: Hálóanalízis (Forrás: saját készítés)

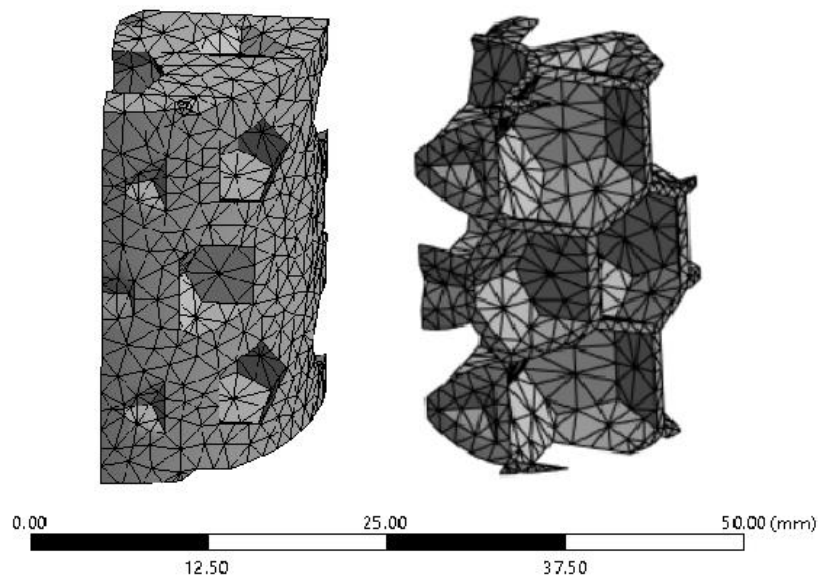
Hálóanalízis az alacsony porozitású alumíniumhab negyedén	
Elemméret [mm]	Összenyomódás [mm]
2	0,0074
1,8	0,0074
1,6	0,0075
1,4	0,0075
1,2	0,0075
1	0,0075

Az általam választott elemméret az 1,6 mm elemméret, mert számomra elég nagy pontosságot biztosít elég rövid lefutási időn belül. Ezen elemmérettől kezdve el kezd konvergálni a deformáció 0,0075 milliméteres értékhez, ezért finomabb elemméret teljesen felesleges, mivel az csak a számítógép, illetve a lefutási idő rovására menne. A diagramon látható a hálóanalízis szemléltetése, a függőleges tengelyen a deformáció mértéke milliméterben, a vízszintes tengelyen pedig az elemméretek nagysága látható szintén milliméterben.



20. ábra: Hálóanalízis diagram (Forrás: saját készítés)

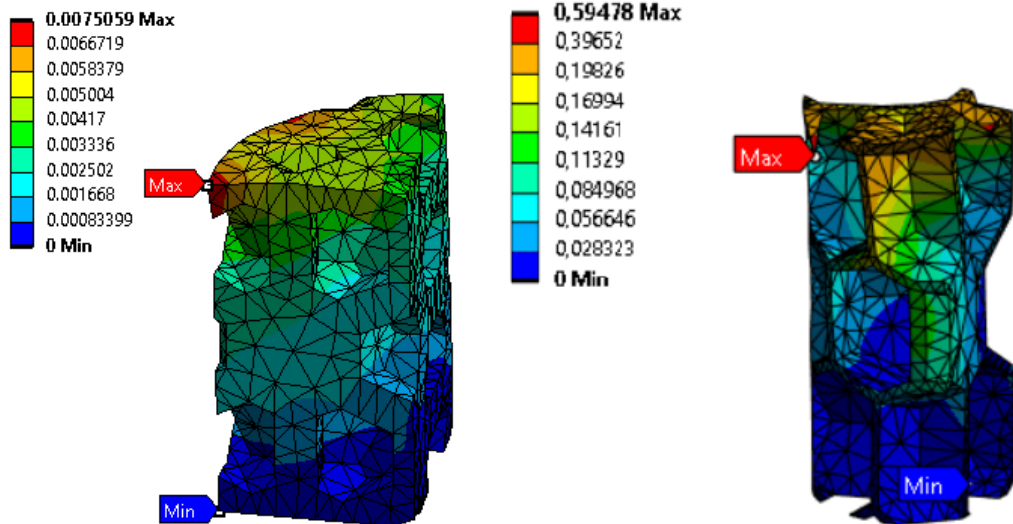
A hálóanalízist csak kizárólag az egyik alumíniumhab darabon végeztem el, az alacsonyabb porozitású modellen. Ennek az volt az alapja, mert a két test hasonló felépítésű, így az egyik modellen elvégzett analízis eredményei reprezentatívak a másik modellre nézve is. Ez a módszer lehetővé tette számomra, hogy gyorsabban dolgozzak, miközben a két modell közötti hasonlóság alapján remélhetőleg megfelelő következtetéseket vonhatok le az adott tulajdonságokról.



21. ábra: Hálózás Ansys szoftverben (Forrás: saját készítés)

Miután a modellen elkészítettem a hálózást, elérkeztem a megoldó előtti utolsó lépéshez, ahol meghatároztam, hogy milyen vizsgálatokat kell végezni a modellen. Figyelmem kizárólag a teljes deformációra irányult, így ezt a funkciót adtam hozzá a megoldóhoz. Ehhez a művelethez a „Solution” menüponton jobbklikkelést alkalmaztam, majd az „Insert” menüben elérhető „Deformation” opciók közül kiválasztottam a „Total Deformation” lehetőséget. Ezzel a lépéssel értem el azt, hogy a modell teljes deformációját vizsgáljam, és a szoftver csak ezt az adatot generálja le számomra. Ezen lépések után a „Solution” menüben végrehajtottam a szimulációt a „Solve” ikonra kattintva. A rendszer szimulációs algoritmusa alapján a megoldó meghatározta az eredményt a teljes deformációra fókuszálva, amelyet a 22. ábra szemléltet. A szimuláció során a korábban definiált paraméterek alapján a szoftver kiszámolta a modell viselkedését. Az eredmények lehetővé tették

számomra, hogy értelmezni tudjam a deformációval kapcsolatos információkat, amelyeket a 4.2-es pontban fogok részletezni.



22. ábra: Végeselemes vizsgálat eredményei (Forrás: saját készítés)

4 Eredmények kiértékelése

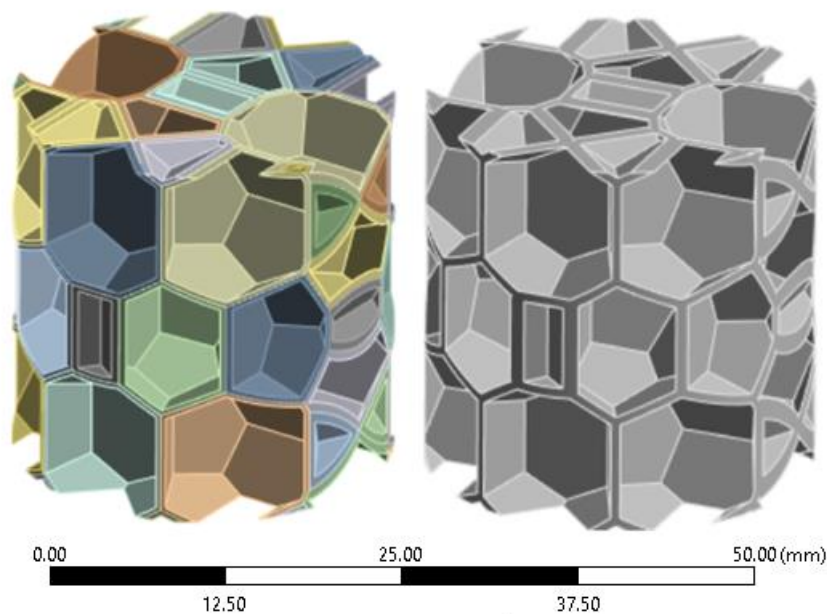
A szakdolgozat célja egy alumíniumhab modell kidolgozása és szimulációs vizsgálata volt, amelynek alapját a Weaire-Phelan egységcella adja. Az alumíniumhabok alkalmazása egyre nagyobb figyelmet kap az ipari és mérnöki területeken, mivel könnyűségük és szilárdságuk optimális lehet számos alkalmazási területen. Ebben a pontban tárgyalom az elért eredményeket, ideértve a Weaire-Phelan egységcella és az abból felépített alumíniumhab modell hatékonyságát, valamint egy hibára hívom fel a figyelmet, amely a modellezés során elkerülendő. A kiértékelés második pontjában pedig bemutatom a végeselemes vizsgálatok eredményeit képekkel, táblázatokkal szemléltetve, majd végül levonom a következtetéseket és összefoglalom a dolgot.

4.1 Zártcellás alumíniumhab modell

A Weaire-Phelan egységcella és az alumíniumhab modell sikeresen elkészült. Nem volt egyszerű feladat, számos komplexitással járt, de a megfelelő háttértudás, előzetes felkészülés és szükséges eszközök megléte lehetővé tette számomra, hogy sikeresen elérjem a célt. A modell elkészítése során több nehézséggel kerültem szembe, hiszen a struktúra bonyolult és speciális geometriával rendelkezik. A sikeres dolgozat mögött kulcsfontosságú tényezők közé tartozott a mélyreható háttértudás megszerzése mind a Weaire-Phelan, mind az alumíniumhabok területén. A rendelkezésemre álló információk és kutatási eredmények alapján megértettem a modellek alapvető jellemzőit és viselkedését. A felkészülés és a tervezés során számos lépésben finomítottam módszereimet, és figyelembe vettem az esetleges kihívásokat. Az idő és energia befektetése végső soron kifizetődött, mivel sikerült létrehoznom a szükséges modellt. Ez a projekt nemcsak a szaktudásom fejlődését jelentette, hanem a kitartásomat és problémamegoldó képességemet is próbára tette.

Az alumíniumhab ütközésmentes modellezésének sikeressége fontos mérföldkőnek bizonyult a projekt során, mert így tudtam szerelés környezetben egyesíteni a modellt. Ennek köszönhetően sikerült hatékonyan létrehoznom és optimalizálnom a modellt alkatrészmodellezés környezetben. Ennek a folyamatnak a sikeressége fontosnak bizonyult, ugyanis ez lehetővé tette számomra, hogy a végeselem szoftverekben az alumíniumhabot egyetlen, összetett alkatrészként kezeljem, ne pedig a modellen belül különálló dodekaéder és tetraikaidekaéder elemekként. Amennyiben nem sikerült volna ütközésmentesen felépítenem az

alumíniumhabot, a végesem szoftverek a modellt a dodekaéderek és tetrakaidekaéderek különálló elemeiként kezelték volna, ami rendkívül bonyolulttá és nehezen kezelhetővé tette volna a szimuláció előkészítésének folyamatát. A 23. ábrán látható, a bal oldali modellen, ahogy az Ansys szoftver külön kezeli az egységcella elemeit. Ez abban nyilvánul meg, hogy a modellt a szoftver beszínezte, míg a jobb oldalon lévő modell szürke, tehát a szoftver egy egységként kezeli a modellt. A sikeres alumíniumhab modellezésnek köszönhetően tehát hatékonyabban és precízebben tudtam dolgozni a szimuláció előkészítése közben, megkönnyítve ezzel például a megfogások és erők hozzáadásának folyamatát.

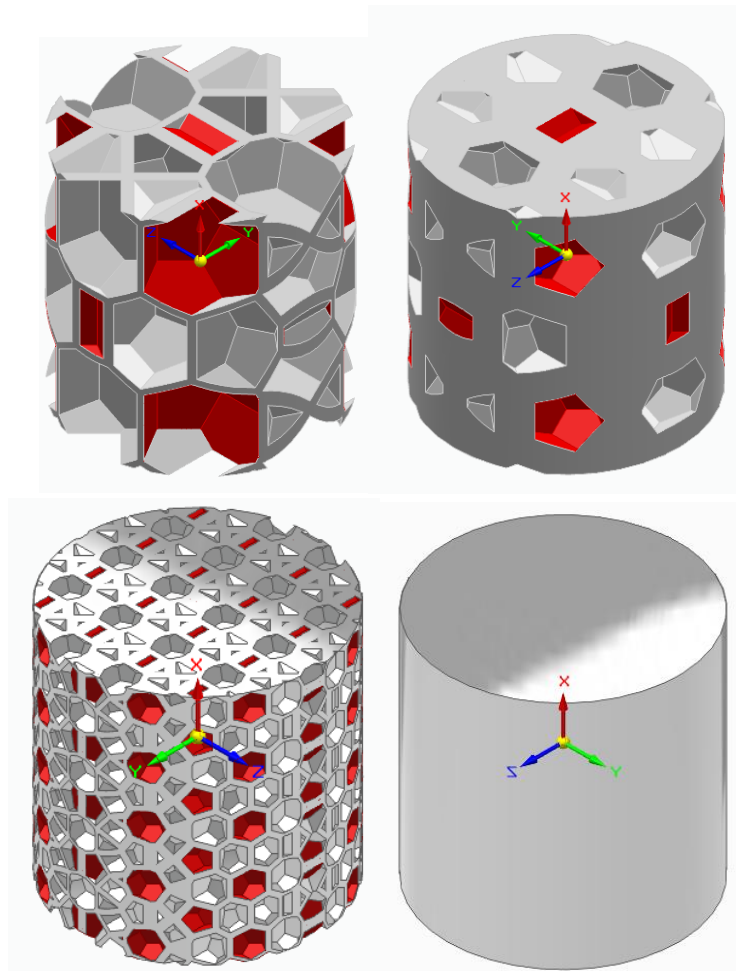


23. ábra: Nem egyesített modell (bal), egyesített modell (jobb) (Forrás: saját készítés)

Az általam készített modellek zártcellás fémhadjellege egyszerűen bizonyítható térfogatösszehasonlításokkal, ugyanis a készített modellek térfogata porozitástól függően kisebb, mint egy tömör alumíniumhengeré. A zártcellás szerkezetnek köszönhetően a modellek könnyűek és erősek, a porozitás csökkenti az anyag súlyát anélkül, hogy jelentősen befolyásolná szilárdságukat és merevségüket. Ennek eredményeként a készített modellek térfogatban hatékonyabbnak bizonyultak, az alumíniumhenger térfogatánál. Ennek jobb szemléltetésének érdekében készítettem még egy harmadik modellt, aminek az egységcellái harmad akkora, mint az első számú modellé, és a vékonyfal vastagsága, pedig 0,33 mm.

4. táblázat: Tömeg, térfogat és porozitás összehasonlítása (Forrás: saját készítés)

	1.Modell	2.Modell	3.Modell	Tömör henger
Tömeg [kg]	0,010	0,040	0,025	0,058
Térfogat [mm ³]	3674,398	14760,155	9297,872	21205,75
Porozitás [%]	82	30	56	0



24. ábra: 1.modell (bal fent), 2.modell (jobb fent), 3.modell (bal alul) és a tömör henger (Forrás: Saját készítés)

Fizikai jellemzők

Felhasználói tulajdonságok

Koordinárendszer:
Modelltér

Anyag
Név: Aluminium, 1060
Sűrűség: 2712,000 kg/m³
Módosít

Pontosság (0 - 1.0):
0.99

Frissítés fájl mentéskor

Nem szorulnak frissítésre a fizikai jellemzők.

Általános Főtengelyekre

Tömeg: 0,010 kg Térfogat: 3674,398 mm³ Felszín: 10495,39 mm²

Tömegközéppont Térfogati középpont

Bejelöl **cm** Bejelöl **CV**

X: 0,00 mm X: 0,00 mm
Y: 0,00 mm Y: 0,00 mm
Z: 0,00 mm Z: 0,00 mm

Tehetlenségi nyomaték

lxx: 0,000 kg-m² lyy: 0,000 kg-m² lzz: 0,000 kg-m²
lxy: 0,000 kg-m² lxz: 0,000 kg-m² lyz: 0,000 kg-m²

Frissítés Bezár Mentés másként... Súgó

25. ábra: 1. modell fizikai jellemzői (Forrás: Solid Edge)

Fizikai jellemzők

Felhasználói tulajdonságok

Koordinárendszer:
Modelltér

Anyag
Név: Aluminium, 1060
Sűrűség: 2712,000 kg/m³
Módosít

Pontosság (0 - 1.0):
0.99

Frissítés fájl mentéskor

Nem szorulnak frissítésre a fizikai jellemzők.

Általános Főtengelyekre

Tömeg: 0,040 kg Térfogat: 14760,155 mm³ Felszín: 8793,54 mm²

Tömegközéppont Térfogati középpont

Bejelöl **cm** Bejelöl **CV**

X: 0,00 mm X: 0,00 mm
Y: 0,00 mm Y: 0,00 mm
Z: 0,00 mm Z: 0,00 mm

Tehetlenségi nyomaték

lxx: 0,000 kg-m² lyy: 0,000 kg-m² lzz: 0,000 kg-m²
lxy: 0,000 kg-m² lxz: 0,000 kg-m² lyz: 0,000 kg-m²

Frissítés Bezár Mentés másként... Súgó

26. ábra: 2. modell fizikai jellemzői (Forrás: Solid Edge)

Fizikai jellemzők

Felhasználói tulajdonságok

Koordináta-rendszer:
Modelltér

Anyag
Név: Aluminium, 1060
Sűrűség: 2712,000 kg/m³
Módosít

Pontosság (0 - 1.0):
0.99



Frissítés fájl mentéskor

Nem szorulnak frissítésre a fizikai jellemzők.

Általános Főtengelyekre

Tömeg: 0,025 kg Térfogat: 9297,872 mm³ Felszín: 25525,83 mm²

Tömegközéppont Térfogati középpont

Bejelöl  Bejelöl 

X: 0,13 mm X: 0,13 mm
Y: -0,02 mm Y: -0,02 mm
Z: -0,03 mm Z: -0,03 mm

Tehetetlenségi nyomaték

l_{xx}: 0,000 kg·m² l_{yy}: 0,000 kg·m² l_{zz}: 0,000 kg·m²
l_{xy}: 0,000 kg·m² l_{xz}: 0,000 kg·m² l_{yz}: 0,000 kg·m²

Frissítés Bezár Mentés másként... Súgó

27. ábra: 3. modell fizikai jellemzői (Forrás: Solid Edge)

Fizikai jellemzők

Felhasználói tulajdonságok

Koordináta-rendszer:
Modelltér

Anyag
Név: Aluminium, 1060
Sűrűség: 2712,000 kg/m³
Módosít

Pontosság (0 - 1.0):
0.99



Frissítés fájl mentéskor

Nem szorulnak frissítésre a fizikai jellemzők.

Általános Főtengelyekre

Tömeg: 0,058 kg Térfogat: 21205,750 mm³ Felszín: 4241,15 mm²

Tömegközéppont Térfogati középpont

Bejelöl  Bejelöl 

X: 15,00 mm X: 15,00 mm
Y: 0,00 mm Y: 0,00 mm
Z: 0,00 mm Z: 0,00 mm

Tehetetlenségi nyomaték

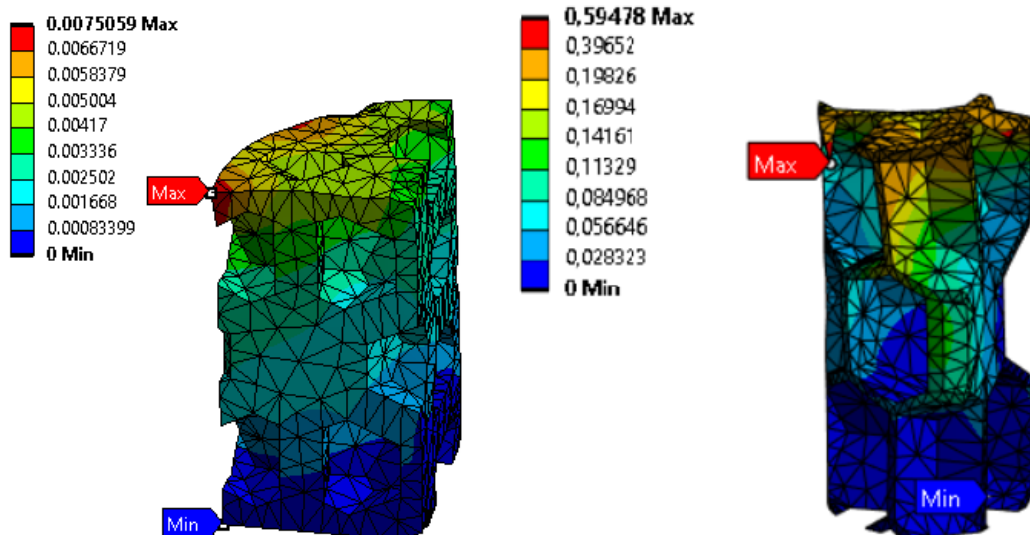
l_{xx}: 0,000 kg·m² l_{yy}: 0,000 kg·m² l_{zz}: 0,000 kg·m²
l_{xy}: 0,000 kg·m² l_{xz}: 0,000 kg·m² l_{yz}: 0,000 kg·m²

Frissítés Bezár Mentés másként... Súgó

28. ábra: Tömör henger fizikai jellemzői (Forrás: Solid Edge)

4.2 VEM szimuláció eredményeinek kiértékelése

A VEM szimulációval célom volt a zártcellás alumíniumhab jelleg, illetve annak bizonyítása, hogy a magasabb porozitású alumíniumhab nagyobb deformációt szenved el, mint az alacsonyabb porozitású. A vizsgálat során a VEM szimuláció kiváló eszközt biztosított számomra ahhoz, hogy virtuális környezetben vizsgálhassam az alumíniumhabok mechanikai viselkedését különböző porozitási szinteken. A szimuláció eredményei alapján megfigyelhetővé vált, hogy a magasabb porozitású alumíniumhabnak jelentősen nagyobb deformáció következik be terhelés hatására, összehasonlítva az alacsonyabb porozitású változattal hasonló peremfeltételek mellett.



29. ábra: VEM vizsgálat eredményei (Saját készítés)

5. táblázat: VEM vizsgálat eredményeinek összegzése (Forrás: saját készítés)

	1.Modell	2.Modell
Térfogat [mm ³]	3647,398	14760,155
Porozitás [%]	82	30
Test skála	1	0,9
Vékonyfal [mm]	0,36	1,62
Terhelés [N]	4000	4000
Megtámasztás	Fixed	Fixed
Elemméret [mm]	1,6	1,6
Maximális elmozdulás [mm]	0,59478	0,0075059
Lefutási idő [s]	8	15

Ezért a végeelem vizsgálatok eredményei alapján egyértelműen megállapítható, hogy a különböző porozitású modellek különböző nagyságú deformációt szenvednek el a terhelések hatására. Az 5. táblázat szemlélteti, hogy a 82% porozitással rendelkező modell esetében a maximális elmozdulás 0,59478 mm, míg a 30%-os porozitással rendelkező modell esetében 0,0075059 mm. Ez az összehasonlítás megmutatja, hogy a magasabb porozitású modell lényegesen nagyobb mértékű deformációt szenved el 4000 N hatására, mint a kevésbé porózus változat. Az eredmények alapján elmondható, hogy a modellek hitelesnek tekinthetők, mert a vizsgálatra adott eredményeik megegyeznek a vártakkal.

A 29.ábrán látható piros címke „Max” felirattal, ez mutatja a modell azon részét, ahol a deformáció a legnagyobb mértékű, a kék címke „Min” felirattal pedig arra a részre mutat rá, ahol a modell a terhelés hatására a legkisebb. Illetve a nyomás hatására a modell deformációjának kinézete is jellegzetes, ugyanis látható, hogy a modell elkezd magába gyűrődni, ennek következtében hordósódás figyelhető meg, amely szintén jellegzetes jelenség a porózus anyagokra nézve.

5 Következtetések

A Weaire-Pelan egységcella alkalmazása jelentős mértékben hozzájárult a modellezés folyamatához, különösen a könnyűség és szilárdság optimális egyensúlyának elérésében. Az egységcella különleges geometriája és térkitöltése kiemelkedő tulajdonságokkal rendelkezik, amelyek lehetővé teszik a rendszerszerkezetek számára a terhelések hatékony elosztását és a deformációk kontrollált kezelését. Az egységcella szabályos geometriája olyan előnyöket kínál, amelyek fontosak a modell teljesítményének optimalizálásában. Ennek köszönhetően a terhelések hatékonyan oszlanak el a struktúrán belül, minimalizálva ezzel az egyes részekre nehezedő terhelések hatását. Ez a geometria lehetővé teszi a struktúra könnyűségét, miközben biztosítja a megfelelő szilárdságot és ellenállást. Az egységcella térkitöltése is kiemelkedő fontosságú a modellezés szempontjából. A térkitöltés révén a struktúra szorosabbá válik, ami növeli az anyag szilárdságát és ellenálló képességét. Ezen előnyök révén a Weaire-Pelan egységcella alkalmazása lehetővé teszi a modellek tervezését és optimalizálását olyan módon, amely kombinálja a könnyűség és szilárdság optimális egyensúlyát. Ez a megközelítés különösen fontos a különféle ipari és mérnöki alkalmazásokban, ahol a szerkezeteknek magas teljesítményt és hatékonyságot kell elérniük, miközben minimalizálják a súlyukat és anyagfelhasználásukat.

A kifejlesztett alumíniumhab modell kiemelkedően sokoldalú és alkalmazkodóképes megoldást kínál, hiszen rendelkezik számos beállítható paraméterrel, amelyek lehetővé teszik a különböző alkalmazási területekre való optimális testreszabhatóságot. Az alumíniumhabok mérete változtatható, geometriája és anyagi tulajdonságai könnyedén módosíthatók, így lehetővé téve a modell széles körű és rugalmas alkalmazását a tervezés és gyártás terén. Az alumíniumhabok méretének változtatásával a modell könnyen alkalmazkodhat különböző projektigényekhez. Legyen szó nagy terhelhetőségű szerkezetekről vagy könnyű, energiahatékony konstrukciókról, a modell könnyedén alakítható az adott feladathoz. Emellett a geometriai változások lehetővé teszik a habok formájának testreszabását, így alkalmazkodva az egyes tervezési specifikációkhoz és funkcionális követelményekhez. Az anyagi tulajdonságok változtatása tovább növeli a modell sokoldalúságát. Az alumíniumhabok különböző szilárdsági,

rugalmassági és sűrűségi tulajdonságokkal rendelkezhetnek, és ezek az adottságok könnyen szabályozhatók a modell segítségével. Ez lehetővé teszi a tervezők és mérnökök számára, hogy pontosan azokat az anyagtulajdonságokat válasszák ki, amelyek leginkább megfelelnek a tervezési paramétereknek és a kívánt funkcióknak. A modell testreszabható eszköz, amely a tervezőknek lehetővé teszi a kreativitás szabadságát. Ezenkívül, a széleskörű alkalmazhatóságának köszönhetően az alumíniumhab modell hatékony eszközként szolgálhat az ipari tervezés, a szerkezetépítés és más területek innovatív megoldásaiban.

6 Összefoglalás

A Szakdolgozatomban egy henger alakú zártcellás alumíniumhab modellt építettem fel, amelynek legfőbb tulajdonságának kellett lennie, hogy paraméterezhető legyen. Ez azért volt fontos, hogy a későbbiekben különböző porozitással rendelkező fémhabmodelleket tudjak vizsgálni. A cél, amelyet kitűztem magam elé, ennek a modellnek a felépítése, majd a modellen végeसेlemes nyomóvizsgálat végzése, amellyel bizonyítható, hogy az általam készített paraméterezhető zártcellás fémhabmodell tulajdonságai megfelelnek a valós zártcellás fémhbjellegnek.

A szakdolgozatom elején irodalomkutatást végeztem, ahol megismertem a fémhabok tulajdonságait, milyen alkalmazási területei vannak, végezetül kutatást végeztem a gyártásukról is. A Weaire-Phelan egységcella felépülésének elvét megismerve, Solid Edge tervező szoftverben megterveztem a saját egységcellámat. Először egy tetrakaidekaédert, majd egy dodekaédert, amelyek a Waire-Phelan egységcella két alapvető pillére. Miután ezek elkészültek a szerelés környezetre váltottam, ahol különböző kényszerekkel elkészítettem az egységcellát. A szerelés környezetben felhasználva a kényszereket, egységcellákból felépítettem egy 125 egységcellából álló alumíniumhab kockát. Egyesítettem az alakzatot, majd visszatértem az alkatrészmodellezési környezetbe, ahol elkészítettem a henger alakú zártcellás fémhabmodellt. A test paraméterezhetőségét tekintve, a paramétereket a dodekaéderen és a tetrakaidekaéderen lehet külön-külön megadni a „Test skálázás” és „Vékonyfal” parancsokkal. A végeसेlemes vizsgálatot Ansys szoftverben végeztem. Ansys szoftverbe beillesztettem a modell negyedét, meghatároztam a számomra szükséges erőt, illetve a megfogást. A hálóanalízis elvégzése után a megfelelő hálósűrűséget kiválasztva végeसेlemes nyomóvizsgálatot végeztem két különböző porozitással rendelkező fémhabmodellen.

A szakdolgozat végén kiértékeltem az alumíniumhab felépítésének és a VEM szimulációnak az eredményességét. A készített fémhabokat térfogatösszehasonlítás alá vettem egy tömör alumínium hengerrel, a VEM vizsgálat eredményei alapján

pedig megállapításra került, hogy a magasabb porozitással rendelkező fémhabmodell nagyobb deformációt szenved el, mint az alacsonyabb porozitással rendelkező, ezen eredmények következtében megállapítható, hogy a készített paraméterezhető zártcellás fémhab megfelel a valós zártcellás fémhabok tulajdonságainak.

Irodalomjegyzék

- [1] N. Babcsan, S. Beke, P. Makk, G. Szamel, and C. Kadar, ‘Pilot Production and Properties of ALUHAB Aluminium Foams’, *Procedia Materials Science*, vol. 4, pp. 127–132, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.MSPRO.2014.07.549.
- [2] Trapp Henci, ‘Új alapanyag az ipar számára’. Accessed: May 23, 2023. [Online]. Available: https://gyartastrend.hu/cikk/uj_alapanyag_az_ipar_szamara
- [3] S. Huluka, A. Abdul-Latif, R. Baleh, A. Larbi, I. Deiab, and K. Khanafer, ‘Biaxial characterization of open-cell aluminum foams from macro to micro responses’, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 868, p. 144588, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.MSEA.2023.144588.
- [4] M. ULBIN and S. GLODEŽ, ‘Fatigue analysis of closed-cell aluminium foam using different material models’, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 31, no. 9, pp. 2787–2796, Sep. 2021, doi: 10.1016/S1003-6326(21)65693-5.
- [5] Wiener Csilla, ‘FÉM HABOK SZERKEZETI ÉS MECHANIKAI VIZSGÁLATA ’, Budapest, 2006. Accessed: May 31, 2023. [Online]. Available: <https://edit.elte.hu/xmlui/bitstream/handle/10831/58348/Kd10345.pdf>
- [6] Orbulov Imre Norbert, ‘Szintaktikus fémhabok gyártása és vizsgálata – szakirodalmi összefoglaló Production and investigation of metal matrix syntactic foams – a literature survey’, *Anyagvizsgálók Lapja*, vol. 2, p. 5, 2019, Accessed: May 31, 2023. [Online]. Available: http://real.mtak.hu/102254/1/avilap_2019ii_lapszam_Orbulov.pdf
- [7] Kenesei Péter, Kádár Csilla, Rajkovits Zsuzsanna, and Lendvai János, ‘Fémhabok előállításának módszerei’, *Anyagok Világa*, vol. 2, no. 2, Apr. 2001.
- [8] N. Babcsán, J. Banhart, and D. Leitmeyer, ‘METAL FOAMS – MANUFACTURE AND PHYSICS OF FOAMING’, in *Proceedings of the International Conference Advanced Metallic Materials*, Nov. 2003, pp. 5–15.

- [9] T. M. T.A.VARGA, ‘Fémhabstruktúrák elemzése és geometriai modellezése’, *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS) Vol. 1. (2016). No.2.*, Feb. 2016.
- [10] Ashcroft and Neil W., *Solid State Physics*. W. B. Saunders Company, 1976.
- [11] D. Weaire and R. Phelan, ‘A counter-example to Kelvin’s conjecture on minimal surfaces’, *Philos Mag Lett*, vol. 69, no. 2, pp. 107–110, Feb. 1994, doi: 10.1080/09500839408241577.
- [12] J. Aquino, I. Duarte, and J. Dias-de-Oliveira, ‘Modelling and effective properties prediction of metal foams’, *Science and Technology of Materials*, vol. 30, no. 1, pp. 43–49, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.STMAT.2018.01.004.
- [13] Aluinvet Zrt., ‘AZ ALUHAB GYÁRTÓJA: ALUINVET ZRT.’, Accessed: Nov. 07, 2023. [Online]. Available: <https://aluhab.hu/a-gyarrol/>
- [14] N. Babcsan, S. Beke, P. Makk, G. Szamel, and C. Kadar, ‘Pilot Production and Properties of ALUHAB Aluminium Foams’, *Procedia Materials Science*, vol. 4, pp. 127–132, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.MSPRO.2014.07.549.
- [15] HiroLaboOECU, *How to make Weaire-Phelan Structure by SolidWorks*. Accessed: Jun. 03, 2023. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=2n32wM16tnY>
- [16] Horváth Miklós, ‘Lexikon’. Accessed: Nov. 09, 2023. [Online]. Available: https://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/Porozita_.htm

Ábrajegyzék

1. ábra: (a) Nyitott és (b) zárt cellák szerkezete [5]	3
2. ábra: Habosítási eljárás fúvatóanyaggal egyszerűsített vázlata [7]....	4
3. ábra: CT felvétel és modell [9]	6
4. ábra: Kelvin-egységcella (jobb) és Weaire-Phelan egységcella(bal) CAD modellje [12]	7
5. ábra: ALUHAB tömb [14].....	8
6. ábra: Sík 3 pont alapján (Forrás:[15] alapján saját készítés).....	10
7. ábra: Létrehozott második sík (Forrás:[15] alapján saját készítés)...	10
8. ábra: A két létrehozott sík (Forrás:[15] alapján saját készítés).....	11
9. ábra: Tetrakaidekaéder (Forrás:[15] alapján saját készítés).....	12
10. ábra: Kivágás háromszögekkel, illetve az elkészült dodekaéder (Forrás:[15] alapján saját készítés)	13
11. ábra: Tetrakaidekaéderek és Dodekaéderek illesztése (Forrás:[15] alapján saját készítés)	13
12. ábra: Az általam alkalmazott Weaire-Phelan egységcella (Forrás:[15] alapján saját készítés)	14
13. ábra: 5 darab egységcella (bal), 25 darab egységcellából álló rész (jobb), alumíniumhab kocka (lent) (Forrás: saját készítés).....	15
14. ábra: Paraméterezhető alumíniumhab (Forrás: saját készítés)	16
15. ábra: Magas (bal), illetve alacsony (jobb) porozitású fémhab modell (Forrás: saját készítés)	18
16. ábra: A fémhabok negyed részei (Forrás: saját készítés).....	19
17. ábra: Outline tree	20
18. ábra: Erő hozzáadása Ansys szoftverben (Forrás: saját készítés).	21
19. ábra: Megfogások Ansys szoftverben (felül), erők és megfogások Ansys szoftverben (alul) (Forrás: saját készítés)	22
20. ábra: Hálóanalízis diagram (Forrás: saját készítés).....	23
21. ábra: Hálózás Ansys szoftverben (Forrás: saját készítés)	24
22. ábra: Végeselemes vizsgálat eredményei (Forrás: saját készítés) 25	
23. ábra: Nem egyesített modell (bal), egyesített modell (jobb) (Forrás: saját készítés)	27
24. ábra: 1.modell (bal fent), 2.modell (jobb fent), 3.modell (bal alul) és a tömör henger (Forrás: Saját készítés)	28
25. ábra: 1. modell fizikai jellemzői (Forrás: Solid Edge)	29
26. ábra: 2. modell fizikai jellemzői (Forrás: Solid Edge)	29
27. ábra: 3. modell fizikai jellemzői (Forrás: Solid Edge)	30

28. ábra: Tömör henger fizikai jellemzői (Forrás: Solid Edge)	30
29. ábra: VEM vizsgálat eredményei (Saját készítés)	31
1. táblázat: Alumínium 1060 tulajdonságok Solid Edge anyagtáblázatból (Forrás: saját készítés)	9
2. táblázat: Vizsgált modellek térfogata és porozitása (Forrás: saját készítés).....	18
3. táblázat: Hálóanalízis (Forrás: saját készítés).....	23
4. táblázat: Tömeg, térfogat és porozitás összehasonlítása (Forrás: saját készítés).....	28
5. táblázat: VEM vizsgálat eredményeinek összegzése (Forrás: saját készítés).....	32