



Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai

Mérnöki Kar

3D nyomtatott egyedi geometriák vizsgálata

Készítette:

Tóth Lilla Éva

LEYPWZ

BSc. gépészmérnök
géptervező szakirány

Konzulens:

Dr. Horváth Richárd

egyetemi docens

2022

Tartalom

Tartalom.....	2
Bevezetés	3
Irodalomkutatás: 3D nyomtatás, mikrostruktúrák.....	4
3D nyomtatás alapjai	4
Szálhúzásos nyomtatási technológia	5
PLA és az ABS bemutatása	6
Az SLA nyomtatás	7
Az SLA nyomtatás anyagai.....	9
M-SLA 3D nyomtatás.....	11
A 3D nyomtatás felhasználási területei	12
Mikrorácsos szerkezetek bemutatása.....	13
Próbatestek bemutatása	15
A geometria tervezése, kiválasztása	15
Struktúra képzés	15
A próbatestek kialakítása, szerkesztése.....	17
A 3D nyomtatás menete	21
Vizsgálatok, eredmények bemutatása	25
Vizsgálati terv készítése	25
Mikroszkópos vizsgálat	25
Tömegmérés	26
A zömítéssel vizsgálat menete, leírása.....	27
A vizsgálati eredmények bemutatása	29
Egy kiválasztott próbatest eredményének bemutatása	30
A terhelés változása 5 mm magasságcsökkenés közben	31
A terhelés változása 30 mm magasságcsökkenés közben	36
Eredmények összefoglalása	37
Összegzés, befejezés	38
Hivatkozások	39

BEVEZETÉS

Napjainkban a nagy léptékű fejlődésnek köszönhetően nap, mint nap újabb és újabb gyártás technológiák jelennek meg vagy esnek át meghatározó fejlesztésen. Jelen korunk egyik legdinamikusabban fejlődő gyártástechnológiai területe az additív gyártástechnológiák világa. A technológiák megjelenésekor tisztán prototípusok, bemutatódarabok realizálására volt használható, mára akár funkciót ellátó munkadarabok létrehozását is lehetővé teszik

Az additív technológiák nagy léptékű fejlődését nem csak az ipar használhatja ki, hanem az orvosi tudomány is, illetve a közel múltban a tudományos kutatásokban is komoly térhódításnak lehetünk szemtanúi.

Dolgozatomban ezen technológiák főbb ismérveit, alkalmazási területeit mutatom be, kiemelt figyelmet fordítva az additív technológiák egyik kizárólagos alkalmazási területének – a tervezett viselkedésű belső térkitöltő szerkezetek, rácsszerkezetek, ismertebb nevén Lattice szerkezeteknek. A Lattice szerkezetek igen precíz szerkezetük és egyediségük előállításához az additív gyártástechnológiáknak sok szempontból fejlődniük kellett.

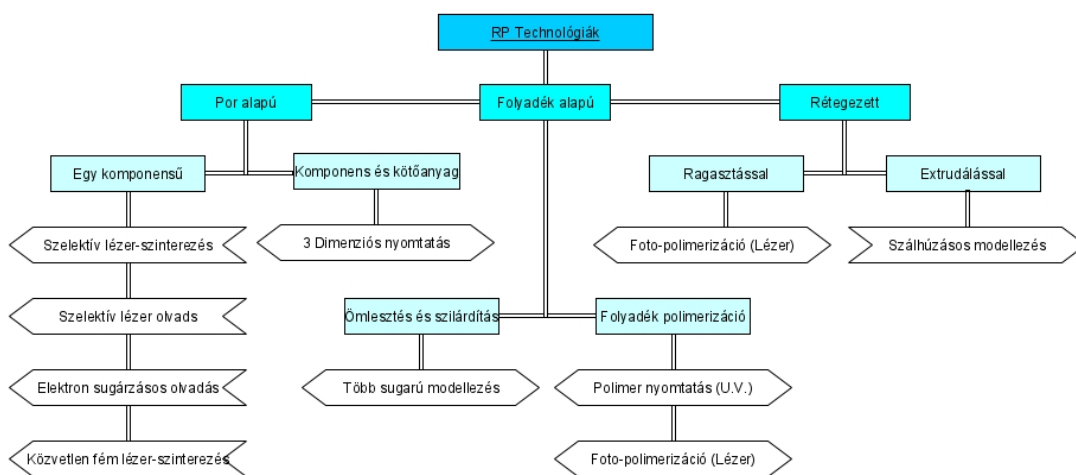
Dolgozatom második felében egy nyomtatással előállított egyedi tervezett viselkedésű geometria, mikrorácsos szerkezet vizsgálatát mutatom be. Egy geometriai kialakításból a falvastagságok megváltoztatásával több változatot hoztam létre, melyeket külön-külön vizsgáltam. Dolgozatom célja a vizsgálat tárgyát képző paraméterek (falvastagságok) hatásának elemzése a mintadarabok zömülési karakterisztikájának fényében.

IRODALOMKUTATÁS: 3D NYOMTATÁS, MIKROSTRUKTÚRÁK

3D nyomtatás alapjai

A mai, számítógépes világban számos olyan vizsgálat, mérés elvégezhető, melyhez nem szükséges a fizikai kapcsolat a vizsgálat tárgya és a vizsgáló között, elegendő ugyanis egy számítógépes, virtuális kapcsolat. A szimulációs világ mellett azonban akadnak olyan esetek, amikor szükség van a gyártmány fizikai térben való vizsgálatára. Ezen probléma orvosolása terjedtek el a *Rapid Prototyping* (RP), azaz gyors prototípusgyártási eljárások vagy másképpen 3 dimenziós nyomtatás. Az RP eljárások az 1980-as évektől kezdtek elterjedni, és azóta folyamatos és jelentős méretű fejlesztéseken megy át. [1]

A prototípus gyártás több sajátossággal, jellemzővel bír. Ezek az eljárások additív eljárások, azaz a testfelépítés rétegenként történik. Elsődleges alaklétrehozó folyamatok, melyek önálló munkadarabokat, gyártmányokat eredményeznek minden esetben. Nem szükséges hozzájuk szerszám, viszonylag rövid gyártási időt igényelnek, könnyedén változtathatóak a gyártmányok tulajdonságai, illetve szinte teljesen automatizáltak az eljárások. A különböző technológiák, különböző módon alakítják ki a modelleket. Ennek köszönhetően az eltérő formaadó technológiák eltérő anyagi és felületi minőséget eredményeznek. [1;2]



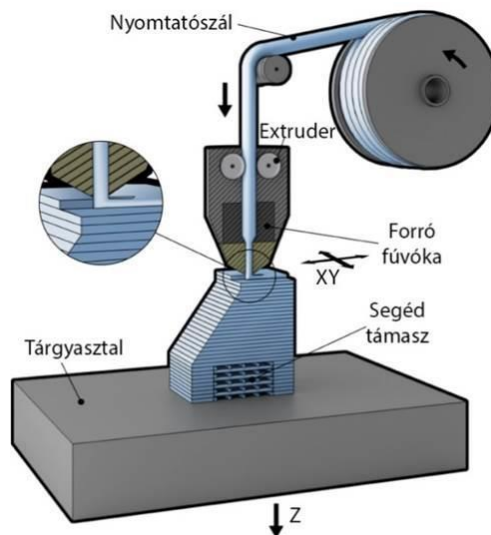
1. ábra A technológiák osztályozása, csoportosítása [1;3 alapján]

Az 1. ábrán jól látható, hogy a prototípus gyártás főbb alapanyagai por, folyadék vagy lemez (rétegezett) alakúak. Az ábra alapján azt is megállapíthatjuk, hogy a prototípusok gyártására már számos fajta lehetőség, technológia áll rendelkezésünkre. [1;3]

Szálhúzásos nyomtatási technológia

A fent említett modellezési technológiák közül az egyik legelterjedtebb és elérhetőbb a szálhúzásos módszer (FDM = Fused Deposition Modeling). Közkedveltsége több szempontból is magyarázható. Ez a nyomtatási típus kis gépmérettel rendelkezik, viszonylag olcsó és egyszerű technológia. [1]

A nyomtatás lényege, hogy a gépbe helyezett, szálal alapanyagot befűzést követően egy forró fűvóka felmelegíti, majd az aktuális réteg kialakításához szükséges helyre extrudálja azt. A nyomtatót előre beprogramozott program irányítja, a fűvókát a helyváltoztatásban pedig léptető motorok segítik. Ezek segítségével az anyag y – és x -koordináta szerint határolható be. A z irányú mozgást, a magasságot a munkaasztal mozgatása (süllyesztése vagy emelése) adja. Az olvadáspont felé hevített alapanyag az elhelyezést követően akár tizedmásodperc alatt is képes megszilárdulni. Miután elkészült a modellből egy teljes réteg, a munkaasztal süllyesztésével és a fűvóka mozgatásával a nyomtató egy újabb szintet kezd el építeni, mindaddig amíg a teljes modell el nem készül. A rétegvastagságot a nyomtatás megkezdése előtt be lehet állítani, de a 0,2 mm-es a legáltalánosabban használt rétegvastagság. Az FDM nyomtatás során szükséges támaszanyagot használni. Erről az anyagról az elkészült elem könnyen leválasztható. [1;4]



2. ábra: Az FDM nyomtatás működése [4]

A szálhúzásos prototípus gyártási technológia eddig ismertett működését a 2. ábra jól bemutatja. Látható rajta a nyomtatósál megvezetése, és a rétegek kialakulása is. Az FDM technológia egyik hátránya ugyan is az, hogy ha nagyobb rétegvastagságot választunk, a kész munkadarabon látatóak lesznek a rétegek, azaz a felület durva

minőségű lesz. Ugyan a nyomtatás nem igényel utókeményítést, utómunkálatként előfordulhat, hogy csiszolni, polírozni kell a kész darabot a kívánt felületi minőség elérése érdekében. Ezzel a technikával $\pm 0,5\%$ méretpontosság érhető el. A rétegrendes kialakítás másik hátulütője a felületi pontatlanság mellett, hogy a modellek szilárdsága igen gyenge az extrudálási iránnyal merőleges irányban. [1;2;4]

A nyomtatás minőségét sok külső tényező befolyásolhatja. Fontos figyelni az környezeti viszonyokra is, főleg a nyitott nyomtatóterű gépek esetén. Az FDM nyomtatók számára ugyanis fontos az egyenletes hőmérséklet a nyomtatás ideje alatt, hogy a nyomtatási hibák, mint például a vetemedés kiküszöbölhetőek legyenek. A jó minőségű nyomtatvány előállítása előtt fontos figyelni a gép állapotára és pontos beállítására. Egy nem egyenletesen mozgó fűvóka esetén ugyanis könnyen zárványok keletkezhetnek a rétegek között, amik tovább gyengítik a szilárdságot. [2;4]

Mint azt már említettem, a nyomtatás minőségét nagyban befolyásolja a nyomtatás előtti precíz beállítás. Fontos ekkor figyelembe venni az alapanyag sajátos tulajdonságait. Napjainkban a szálhúzásos nyomtatás során a két legkedveltebb alapanyag a PLA és az ABS. Ezen két anyag nem csak az iparban kedvelt, hanem a hétköznapi emberek körében is, hiszen könnyen és olcsón beszerezhetőek, mindemellett számos számítógépes program adatbázisában is szerepelnek. A következőkben ezt a két ismert anyagot mutatom be részletesebben. [2;4]

PLA és az ABS bemutatása

A PLA a Polylactic Acid, azaz a tejsav elnevezéséből nyerte rövidítését. A biopolimerek közé tartozik, kémiai összetétele: $(C_3H_4O_2)_n$. A sűrűsége függ a gyártási eljárástól, de a hozzáadott anyagtól is, mint például a színező anyagoktól, értéke pedig $1,210-1,430\text{ g/cm}^3$ közé tehető. A PLA olvadáspontja körülbelül $200\text{ }^\circ\text{C}$, azonban a nyomtatásra a megfelelő hőmérséklete $190-210\text{ }^\circ\text{C}$ között változik. [2;4]

A vízben nem oldódó anyagot biológiai anyagokból, mint kukoricából, búzából vagy cukorrépából állítják elő. Bomlásakor is többnyire természetes anyagok keletkeznek. $60\text{ }^\circ\text{C}$ felett a bomlása néhány hónap alatt végbe megy, azonban szobahőmérsékleten évekig stabil marad. [4]

A PLA-ból sok szín változat, stílus készül, így széleskörben felhasználható. A nyomtatószálak között ennek az anyagnak a legalacsonyabb az olvadási pontja, nyomtatás közben nem keletkezik kellemetlen gőz vagy gáz. A PLA-val való

nyomtatáshoz nincs feltétlenül szükség fűtött asztalra, hiszen a zsugorodása és a vetemedése kicsi. [4]

A PLA merev, így nem ajánlott nagyon koptató hatású igénybevételnek, vagy hajlékony munkadarabként nyomtatni. A PLA bomlási hőmérséklete miatt a 60 °C feletti üzemhőmérséklet mellett sem ajánlatos az alkalmazása. [4]

Az ABS mozaikszó az akrilnitril-butaidén-sztirol elnevezésből ered. Ez egy amorf polimer, melynek kémiai képlete: $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. Az ABS a sztirolnak köszönhetően jól feldolgozható, keménységét, kémiai ellenálló képességét és hőállóságát az antikrilnek köszönheti, míg a butaidéntől rugalmasabb lesz. Egyéb adalékanyagok hozzáadásával és az alkotók arányának megváltoztatásával specifikus tulajdonságokat érhetünk el, melyek az ABS-ből készült késztermék minőségét javíthatják. [4]

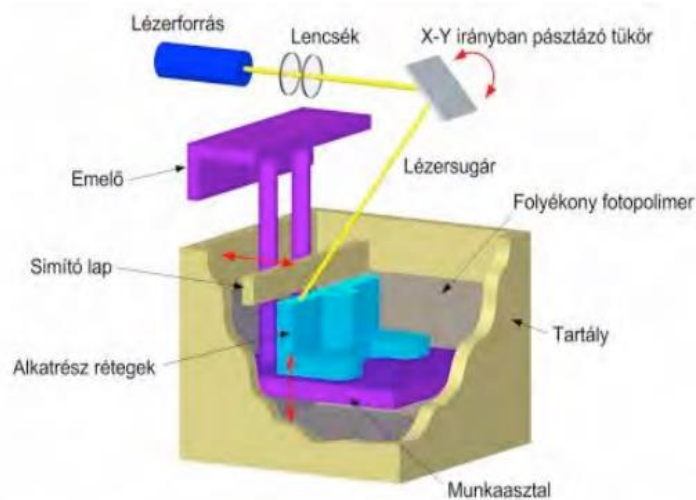
A PLA után az ABS a második leggyakrabban használt nyomtatási alapanyag, ami nem meglepő jó mechanikai tulajdonságai, ütésállósága és kedvező ára mellett. Nyomtatása közben szükséges az extruder számára a magasabb hőmérséklet biztosítása, ami 220-250 °C közötti hőmérsékletet jelent, mindemelett szükséges az asztal felfűtése is 90-110 °C közé. A jó minőségű ABS nyomtatványok elkészítéséhez ajánlott a zárt terű nyomtatók használata, hiszen a burkolat segít megtartani az állandó hőmérsékletet, így a nyomtatott modell kihűlése egyenletesebbé tehető, ami megelőzheti a vetemedést. A körülményes nyomtatásához hozzátartozik még az ABS nagy vetemedő hajlama, melyet sok esetben a karima kialakításával próbálnak megelőzni, de ez a technika azonban utómunkálatot eredményez, melyek könnyedén elvégezhetők. A nyomtatás közben figyelni kell a jó szellőztetésre is, ugyanis a formaadási folyamat közben intenzív gázok, gőzök képződnek. [4;5]

Az ABS jól ellenáll az időjárási körülményeknek, nem nedvszívó, azonban az UV sugárzás károsítja. Ez egy biológiailag nem lebomló, nem mérgező anyag, melyből nem csak nyomtatni szoktak, hanem a fröccsöntés alapanyagaként is jellemző, mint például a LEGO termékek készítésénél. [2;4]

Az SLA nyomtatás

Az SLA a sztereolitográfia szóból származik. Ez egy additív eljárás, mely során egy fényforrás segítségével térhálósítja a fotopolimer gyantát. Az SLA nyomtatás során UV

lézereket használnak a polimer gyanta szelektív keményítésére. A megszilárdítási folyamat rétegről rétegre történik. [6]



3. ábra Az SLA nyomtatás felépítése [7]

Mint az a 3. ábrán is látszódik, a nyomtatás során a folyékony gyanta egy gyantatálcán helyezkedik el. Az SLA nyomtatás az 1986-os megjelenésével az első 3D nyomtatásos technológiának tekinthető. A mára elérhető technológiák közül ez az egyik legpontosabb alkatrészgyártási eljárás és mindemellett költséghatékony is. [6]

A nyomtatás kezdete előtt az építőplatform elmerül a folyékony polimer tartályban, egy rétegmagasságra a folyékony felülettől. Ezután elkezdődik a nyomtatás, mely rétegről rétegre történik. Az ultraibolya lézer hatására a gyantát alkotó szénláncok megszilárdulnak, erős, felbonthatatlan kötést kialakítva maguk között. A lézersugár pályáját egy tükörkészlet segítségével irányítják a nyomtatás során. A nyomtatás végeztére az anyag nem teljesen keményedik meg, így utókezelés szükséges a kívánt termikus és mechanikai tulajdonságok elérése érdekében. [6]

A FDM technológiával szemben, az SLA nyomtatás során hőre keményedő polimereket használnak. Ennek köszönhetően a fotopolimerizációs folyamat visszafordíthatatlan. Az SLA technológiával készített alkatrészek felmelegítés hatására nem megolvadnak, hanem megégnek, így nincs mód az így készített testek folyékony állapotba való visszaállítására. [6]

Ahogy minden gyártási technológia során, így az SLA 3D nyomtatás során is van több olyan paraméter, amik a gyárthatóságot befolyásolják, ugyanis ezeket módosítani nem

lehet, a gyártó határozza meg őket (például: munkaterület nagysága, felhasználható anyagok). Az egyik legfontosabb beállítást, a rétegvastagságot azonban az építő állíthatja be, a gyártó által meghatározott intervallumon belül. Ez általában 50 és 100 mikron között van. A kisebb rétegvastagság nagyobb pontosságot eredményez, de ezzel együtt az esély is növekszik a sikertelen nyomtatásra, éppen ezért a 100 mikronos rétegvastagságot használják leggyakrabban. [6]

A másik mérvadó paraméter az építkezés iránya. Az SLA nyomtatók között ugyan is van, amelyikkel fentről lefelé haladva történik az építkezés, illetve van olyan is, ahol ugyan ez alulról felfelé megy végbe. Az első esetben a lézerforrás a tartály fölött található, a készülő alkatrész felfelé áll, az építő platform pedig a rétegek kialakítása után lefelé halad. Az alulról építkező nyomtatás esetén a lézer az átlátszó fenekű tartály alatt helyezkedik el. Minden réteg kialakítása után a platform felfelé mozdul leválasztva a tartály szilikonnal bevont aljáról a már megkeményedett anyagot. Ezt a fajta nyomtatási elrendezést inkább az asztali nyomtatókban használják, hiszen méretük korlátozott a tartály aljáról való leválasztás miatt, ugyan is, ha a leválasztás során túl nagy erő hat a testre, az a nyomtatás tönkremeneteléhez vezethet. Az ipari SLA rendszerekben tehát a felfőlől lefelé irányuló nyomtatást alkalmazzák. [6]

Az SLA nyomtatás anyagai

Mint már feljebb említésre került, az SLA nyomtatás során folyékony gyantát használnak. Napjainkban rendkívül széleskörű a választék ezek között a gyanták között. A választást az alkatrész végső felhasználása szempontjából kell kiválasztani például kopásállóság, hőállóság, felületi minőség vagy akár beszerzési ár szerint. [6]

Az SLA nyomtatással készülő alkatrészek bármelyik irányítottágú nyomtatóval készülnek, bármilyen anyagból, mindig szükséges némi utókezelés. Erre több lehetőség is van a kész alkatrészek magas fokú megmunkálhatóságukból adódóan. Ez az utómunkálat lehet akár csiszolás, polírozás, szórás vagy akár olajos csiszolás. Az utómunkálatokat a megtámasztás helyének eltüntetése érdekében és a gyanta tulajdonságainak maximalizálása érdekében kell elvégezni. [6;8]

Anyag	Jellemzők
Szabványos gyanta	+ Sima felület
	- Viszonylag törékeny
Nagy részletgazdagságú gyanta	+ Nagyobb méretpontosság
	- Magasabb ár
Tiszta gyanta	+ Átlátszó anyag
	- Utófeldolgozást igényel a nagyon tiszta felület érdekében
Önthető gyanta	+ Formamintázatok létrehozására használható
	+ Alacsony hamuszázalék kiégés után
Kemény vagy tartós gyanta	+ ABS-szerű vagy PP-szerű mechanikai tulajdonságok
	- Alacsony hőállóság
Magas hőmérsékletű gyanta	+ Hőállóság
	+ Fröccsöntéshez és hőformázó szerszámokhoz használják
Fogászati gyanta	+ Biokompatibilis
	+ Magas kopásállóság
	- Magas költség
Rugalmas gyanta	+ Gumiszerű anyag
	- Alacsonyabb méretpontosság

1. táblázat: A nyomtatás során használatos gyanták főbb jellemzői [6]

Az SLA nyomtatás közben leggyakrabban használt anyagok sajátosságait az 1. táblázatban hasonlítottam össze. A következő, 2. táblázatban pedig az SLA nyomtatók két féle kialakításának sajátosságait foglalom össze.

	Asztali SLA	Ipari SLA
Keményítés iránya	Lentről felfele	Fentről felfele
Előnyök	Alacsony költség Könnyű elérhetőség	Nagy építési terület Rövidebb építési idő
Hátrányok	Kisebb építési terület Kisebb anyagválaszték Több utómunkálat	Magas költség Szakértői kezelés Teljes tartályürítés anyagcsere esetén
Építési méret	max 145 x 145 x 175 mm	max 1500 x 750 x 500 mm
Rétegvastagság	25-100 µm	25 - 150 µm
Méretpontosság	± 0,5 % Alsóhatár: ± 0,010 - 0,250 mm)	± 0,15 % Alsóhatár: ± 0,010 - 0,030 mm)
Tartószerkezet	Túlnyúlások, hidak alátámasztása Ferde elhelyezkedésű alkatrészek - nem szempont a minimális alátámasztás	Túlnyúlások, hidak alátámasztása Lapos elhelyezkedésű alkatrészek - minimális alátámasztás
Anyagválaszték	Szűk választék Hőre keményedő, rugalmas gyanta	Széles választék Hőre keményedő, rugalmas gyanta

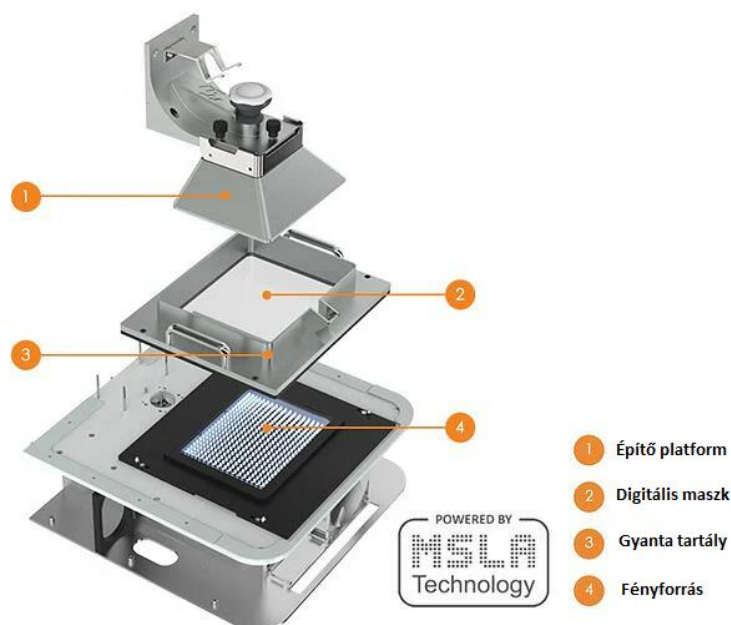
2. táblázat: Az SLA nyomtatás fajtáinak összehasonlítása [6]

M-SLA 3D nyomtatás

Dolgozatom elkészítéséhez 3D nyomtatással állítottam elő próbatesteket, majd teszteltem őket. A próbatestek elkészítéséhez egy M-SLA (Masked Stereolithography Apparatus = maszkolt sztereolitográfiai berendezés) 3D nyomtatót választottam. Ez a technológia az SLA nyomtatás egyik módosított, továbbfejlesztett formája. Ugyan azon az elven működik az M-SLA nyomtatás, mint az SLA és ugyan azon anyagokkal képes nyomtatni. A különbség csak annyi, hogy a keményedést ultraibolya lézer sugár és tükrök helyett UV fényrel és LCD képernyővel irányítják. [9]

Az MSLA nyomtatóban a könnyen változtatható LCD képernyőnek köszönhetően nem csak egy pontban képes a nyomtató a gyantát keményíteni, hanem egy teljes rétegvastagságot egyszerre tud kialakítani. Ez az LCD kijelzőnek köszönhető, ami képes felvenni az éppen nyomtatandó réteg alakját. A kijelző az UV fényforrás fölött helyezkedik el, így mikor felveszi a kellő alakot, akkor ott engedi át a fénysugarat, ahol a keményítés szükséges. Ezzel az LCD kijelző lényegében egy maszkot alkot a fénysugarak felett, innen ered az elnevezése is. [9]

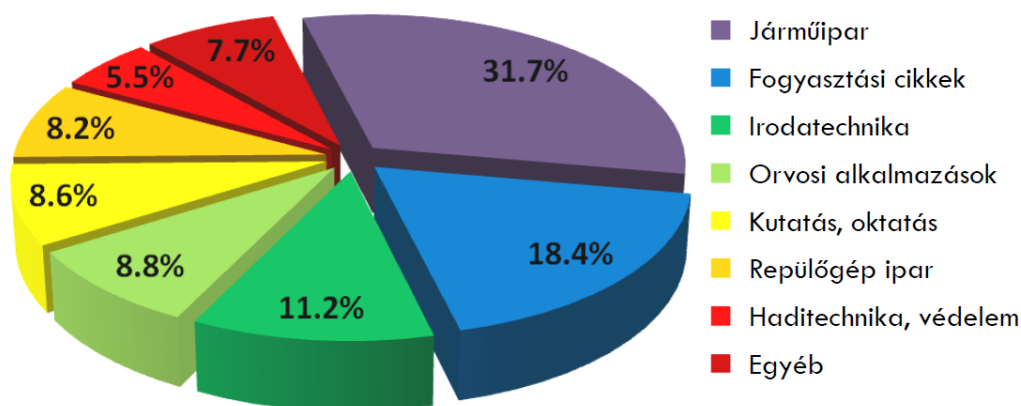
Az MSLA nyomtatók alulról építkező nyomtatók. Felépítését a 4. ábra ismerteti. Az LCD képernyőt egy karcgátló védi a kiszivárgó gyanta és más folyadékok ellen. Ezen nyomtatófajták pontossága az LCD kijelzők felbontásától függenek.[9]



4. ábra AZ MSLA nyomtatók felépítése [9]

A 3D nyomtatás felhasználási területei

A 3 dimenziós nyomtatást, vagy más néven a prototípus gyártást napjainkban már nem csak prototípusok előállítására használják, hogy a méréseket elvégezhessek vagy szemléltető eszközként, hanem továbbfejlesztett alkalmazási területek is vannak. E fejlődő iparág sokak szerint messze van még a vég kifejlődéstől, még sok új technológia és akár új anyag vár kifejlesztésre ezen alkotási folyamatok segítségével. [2]



5. ábra RP eljárások felhasználási területei [2]

Mint az az 5. ábrán is jól látható, a prototípus gyártás sok területen elterjedt, sok iparág, sok munkáját megkönnyítette. Erre az egyik legszemléletesebb példa az építészet. Az épületek tervezése során már a virtuális tervezőszoftverek is egyre kedveltebbek lesznek, de a tervezők számára a makett készítés az elsőrendű szemléltető eszköz. A 3D-s technológiák elterjedésével a bonyolultabb alakzatok, szerkezetek, épületelemek megjelenítése már nem jelent komoly kihívást. Ezzel igen megnőtt a tervezések során az időnyeresség és a makettek kisebb költségvetéssel készíthetők el, mint a régebbi eljárásokkal készített modellek. [10]

Napjainkban számos olyan terület van, ahol kis darabszámú sorozatgyártást alkalmaznak, vagy esetlegesen egyedigyártást. Remek példa az ilyen alkalmazásra a filmipar vagy a színház. A produkciók kellékeinek ugyanis precíz, jóminőségű munkát kell végezniük, sokszor rövid időn belül. A 3D nyomtatás mellett nem csak ezen szempontok szólnak a filmiparban, hanem az is, hogy a szoftverekkel könnyen módosíthatnak a nyomtatandó eszközökön, így könnyen személyre szabhatóak lehetnek a kellékek, amik megkönnyíthetik a színészek munkáját. Ide sorolhatjuk azonban még azokat az alkatrészeket is, melyek egykoron tömeggyártási cikkek voltak, időközben a gyártásuk leállt, de a késztermékből hiány lép fel. Ekkor a helyettesítendő elem

digitalizálásával és a 3D nyomtatás valamelyik technológiájával könnyen pótolható a hiány. [10]

Mindezen alkalmazások mellett talán a legfontosabb és legizgalmasabb felhasználási területe a 3D technológiáknak az egészségügyben való alkalmazása. Az orvosi tudományban szintén az egyedi tulajdonságokon alapuló gyártás miatt terjedt el és vált kedvelté. Jelenleg számos kutatás és kísérlet zajlik az eszközök, alkatrészek, sőt szervek nyomtatásával kapcsolatban is. A 3D nyomtatás szóba jött már orvosi segédeszközök gyártása során, mint például a végtag rögzítők, sebészeti segédeszközök kialakítása vagy az implantátumok alkalmazása során. [11]



6. ábra A 3D nyomtatás felhasználási területei [10]

Összefoglalva a 6. ábra szemléletesen tárja elénk, mire is jó a prototípusgyártás, 3D nyomtatás. 3D nyomtatott eszközökkel találkozunk a művészetben, a jármű iparban, az egészségügyben vagy az alkatrészgyártás területén. A kutatás, oktatás területében számos új területet nyitott meg az additívgyártás technológiáinak használata. Ezen folyamatok során ugyanis olyan bonyolult, összetett alakzatok, szerkezetek készíthetők el, melyek a megvalósíthatóságot egy új szintre emelik. Ilyen szerkezetek a mikrorácsos szerkezetek is, melyekről a következőkben lesz szó.

Mikrorácsos szerkezetek bemutatása

A rácsos elemek a sejtes anyagok közé tartoznak, melyeknek kiváló a szerkezeti reakciója. Ezeket az anyagokat több funkciós képességek és a szokatlan deformációs mechanizmusok megvalósítására fejlesztik. A mikrorács nevű szuperszerkezeteket

körülbelül 2011 óta kutatják. Ezek a szerkezetek a természet bonyolult szerkezeteinek mására kezdtek el kialakulni, mint például a csont vagy a fa szerkezete alapján, melyeknek a biológiai szerkezetek ugyan is nagyon jó mechanikai tulajdonsággal rendelkeznek, mint például a magas energiaelnyelő képesség, nagy szilárdság vagy az ütésállóság. A rácsos szerkezetek fejlesztésével ezeket a kedvező tulajdonságokat szeretnék elérni. [12;13]

A metaanyagok legfőbb tulajdonsága, hogy a szerkezetük ismétlődő elemekből áll. Ezek az elemek finom architektúrát alkotnak, mely tulajdonságai nem csak az anyagi minőségnek köszönhetők, hanem a kialakításnak és a geometriai sajátosságoknak is. Dolgozatomban egy ilyen újfajta struktúrát, mikrorácsot fogok vizsgálni. [14;15]

Az additív gyártás fejlődésével a mikrorácsos szerkezetek területén is nagy mértékű fejlődés vette kezdetét, ugyanis a 3D nyomtatásos technológiák segítségével egyre pontosabb alkatrészek gyártására vagyunk képesek. Ez kifejezetten fontos a metaanyagok kutatása és fejlesztése szempontjából, hiszen ezen anyagok a legfőbb tulajdonságukat a szerkezeti felépítésüknek köszönhetik. [14]

Felhasználási területein az energiaelnyelő, hullám és rezgés áteresztőképességet csökkentő hatásait, illetve kis sűrűségüket használják ki leginkább. Erre példaként szolgál a 7. ábrán látható fejtűző, melynek belsejét mikrorácsos szerkezet alkotja a nagyobb védelem érdekében, mely szintén 3D nyomtatással készül. [16]



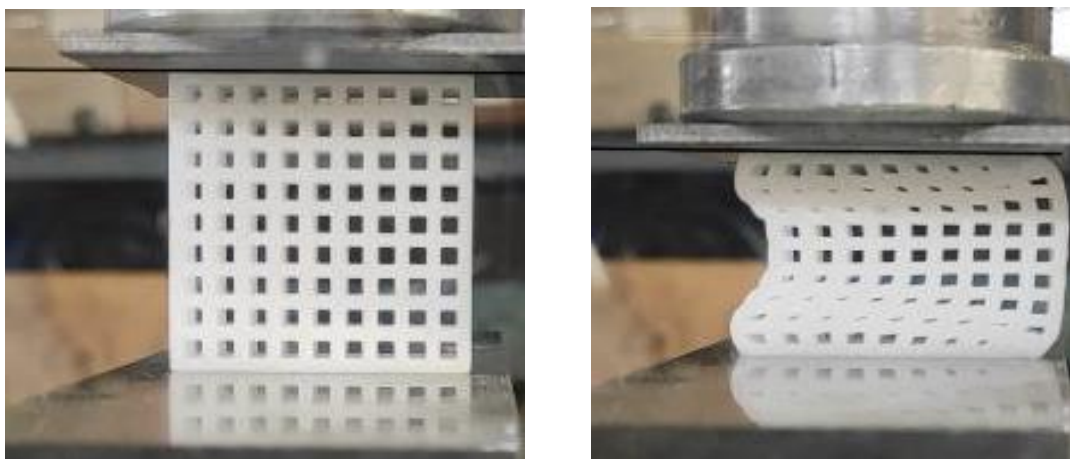
7. ábra Mikrorácsos szerkezetű fejtűző [16]

PRÓBATESTEK BEMUTATÁSA

A geometria tervezése, kiválasztása

Kísérletek alapján megállapították, hogy a hatszoros szimmetriájú mikrorácsos anyagok nyomószilárdsága nagyobb, mint a háromszoros szimmetriával rendelkező anyagoké. Minél több szimmetria tengely van az alakzatban, annál stabilabb lesz, jobban ellen tud állni a rá eső terheléseknek. A legkedveltebb szerkezeti alkotók az egyszerű geometriai elemek, mint a háromszög, a négyzet vagy egyéb szabályos sokszögek, hiszen ezeknek több szimmetria tengelyük is van. [12]

A 8. ábrán látható vizsgálatok során egy egyszerű, négyszögletekből álló mikrorácsos szerkezetet vizsgáltak, mely SLS nyomtatási technikával, PA12 poliamidból készült. A képen jól látható, hogy a szerkezetben a nyomás zömülés mellett oldalirányú kihajlást eredményezett, amit a dolgozatomban végzett vizsgálatok során szeretném elkerülni. [15]

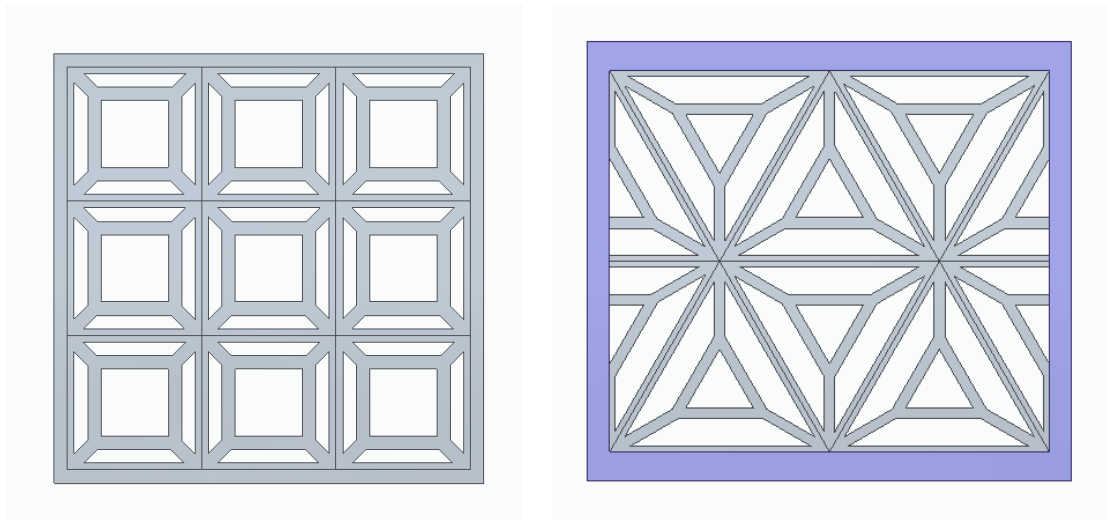


8. ábra Egy kísérlet során vizsgált próbatest zömítés előtt és után [15]

A fenti megállapítások és az előző vizsgálat eredményeit figyelembe véve különböző koncepciókat vettem számításba. Ezen alakzatokkal való kísérletekről, tanulmányokról, zömítési vizsgálatokról számos kutatást lehet találni. Az alakzatok kialakítása során fontos megemlítenem a Poisson tényezőt. A definíció alapján az az anyag, melynek negatív a Poisson tényezője, nyomás hatására zsugorodni fog. [14]

Struktúra képzés

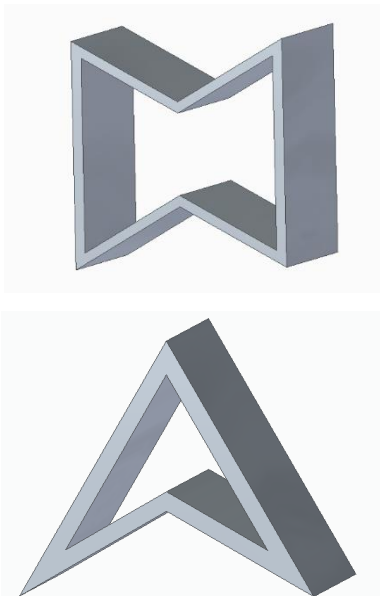
Először a négyzet alakzat mellett maradván próbáltam egy újabb struktúrát létrehozni, majd ennek a mintájára áttértem a háromszög alakzathoz is. Ezeket a koncepciókat a 9. ábra mutatja be. Mindkét alap alakzatba egy-egy ugyan olyan alakot szerkesztettem be kötőelemekkel összekötve.



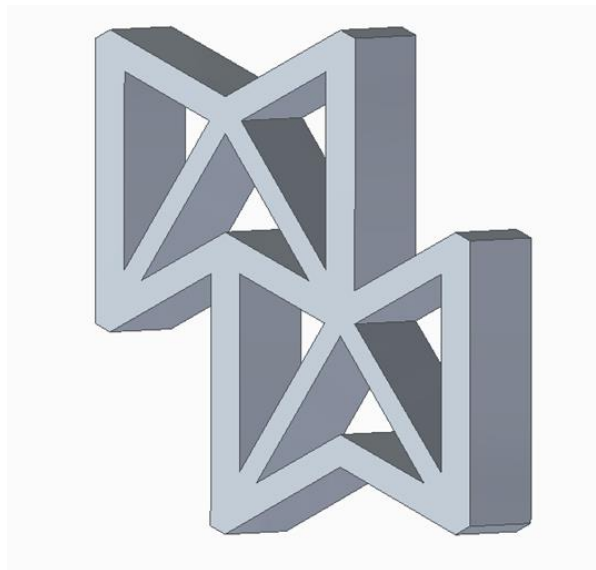
9. ábra Duplasoros háromszög alakzat, illetve a duplasoros négyszög alakzat

Dolgozatomban olyan szerkezetet szeretnék vizsgálni, mely zömítés során szemlélteti egy mikrorácsos szerkezetek jellemzőjét, azaz nyomás hatására nem kihajlik, hanem összezömül, összeroskad. Az általam tervezett alakzatok szerkezete bizonytalannak minősült a vizsgálat szempontjából. Ezt a megállapítást a 8. ábrán látható vizsgálatra alapozva hoztam meg.

A vizsgálatom eredményessége érdekében egy olyan geometriát választottam, mely két alape geometria kombinációjából készül. A szerkezetekkel kitöltött próbatestek már többször is zömítésre, vizsgálatra kerültek számos szakirodalomban. Ezen két elem kombinációjának alapötletét a [14] forrás adta.



10. ábra Az alape geometriák



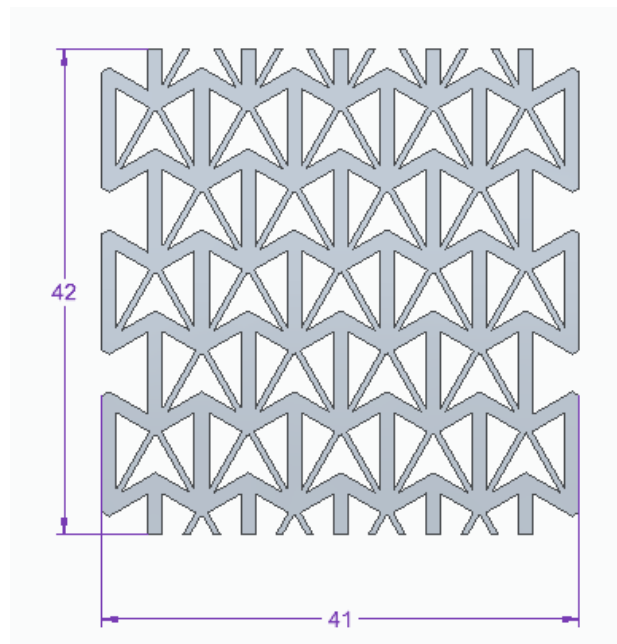
11. ábra Az összeillesztett elem

A 11. ábrán jól látható az a geometria, mely a 10. ábrán látható alageometriákból tevődik össze. Ez a geometriai kialakítás nyomás hatására egy előzetes vizsgálat során már össze zömült kihajlás jelentős kihajlás nélkül, azaz viselkedését stabilnak tekinthetjük. [14] Dolgozatomban végzett vizsgálatokhoz ezért ezt a geometriai felépítést választottam.

A próbatestek kialakítása, szerkesztése

A tervezési, rajzolási munkákat a *Solid Edge 2022*-es, szabadon elérhető programverzióval készítettem.

A mikrorácsos szerkezetek egyszerű, 2,5 vagy 3 dimenziós geometriai elemek sokszoros ismétlődésével jönnek létre. A 12. ábrán az általam választott geometriából összeállított próbatest látható. A kialakítást és a méretek megválasztását a későbbiekben mutatom be.

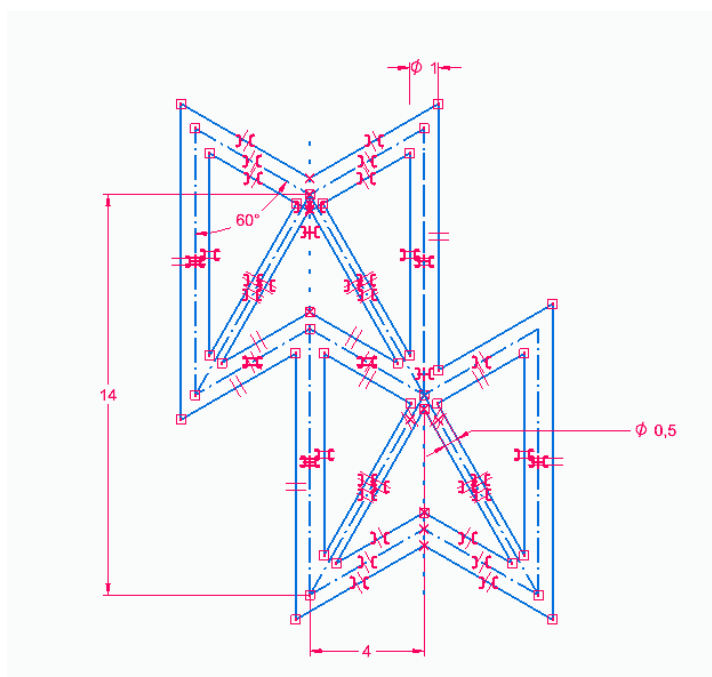


12. ábra A vizsgált szerkezet képe

A vizsgálatokhoz a próbadarabokat 3D nyomtatással hoztam létre. A vizsgálatok során a fő szempont az azonos szerkezetű geometriai elemek összehasonlítása különböző falvastagságok mellett. Így a geometria megrajzolása során - a gyors és könnyű nyomtatás érdekében - több dologra is figyeltem, mely meggyorsította a nyomtatás előkészítését.

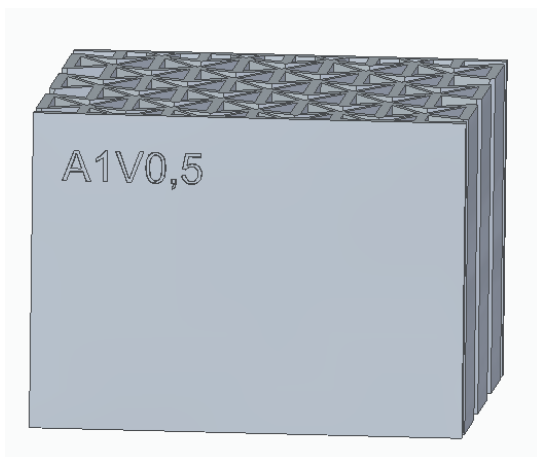
Az első próbatestet egy vázlatban rajzoltam meg, illetve egy kihúzással alakítottam testté a geometriát. Kiháználva az alakzat szimmetria tengelyét nem csak a rajzolást gyorsítottam meg, de a későbbi méretváltoztatás is egyszerűbben történt. Mint az a 13.

ábrán is látszódik, alap geometriaként nem csak egy elemet rajzoltam meg, hanem két, összekapcsolódó alakzatot. Ez azért volt fontos, hogy az elemek kapcsolódása könnyen meghatározható legyen és ez ne okozzon gondot a sokszorozás közben, melyet a „Minta” lehetőség segítségével végeztem el. A fő méretek szintén látszódnak az ábrán. két kapcsolódó alakelem belső szimmetria tengelyének a magassága 14 mm, a szélessége pedig 8 mm. Ezen méretek a 16 féle próbadarabon megegyeznek. Csak úgy, mint a négyzet alakzat behajlása, ami minden esetben 60° -os szöget zár be. Ezek a meghatározott tulajdonságok biztosítják a próbatestek hasonlóságát a különböző falvastagságok mellett.

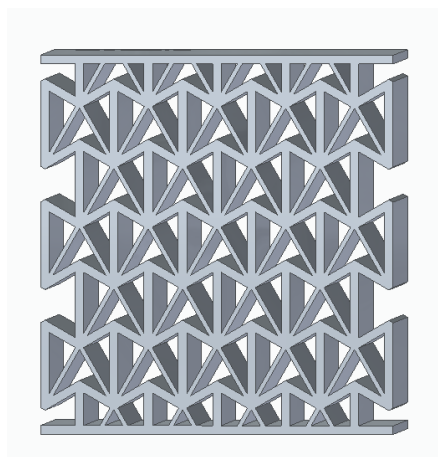


13. ábra A geometria alap vázlata

A próbadarab gyártás szempontjából fontosnak találom megemlíteni, hogy minden egyes próbadarabot a falak vastagságának megfelelő jelöléssel láttam el. Ez a jelölés az alkatrész tetején található, a testbe mélyítve, hogy a vizsgálatok során ne képezzen akadályt, mint az a 14. ábrán látható. Ennek a jelölés rendszernek a beazonosításban van nagy szerepe, hogy ne keljen ehhez minden vizsgálat előtt méréseket végezni a falvastagságok megállapításához.



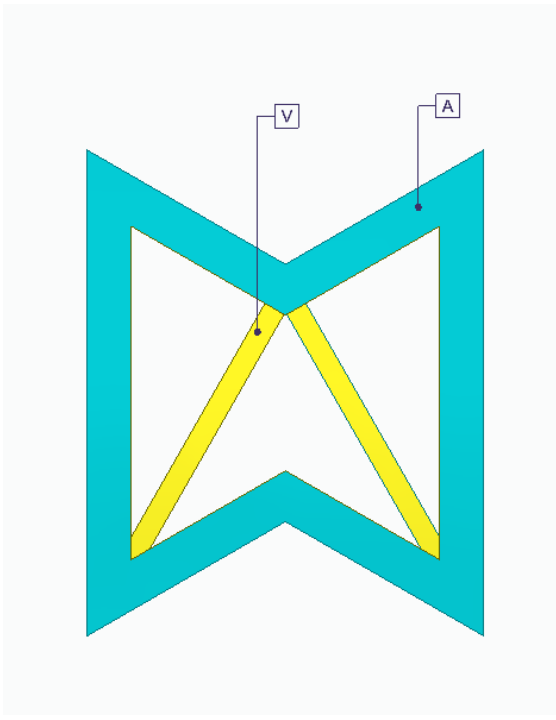
14. ábra A jelölés bemutatása



15. ábra A teljes geometria

A 15. ábrán látható a teljes, vizsgálat alá vethető geometria. Jól látható, hogy a test 5 teljes sorból áll össze, melyek közül minden páros számú sor 4 és minden páratlan számú sor 5 db alapelemet tartalmaz, ezzel szimmetrikussá téve a testet. A test alján és a tetején egy egyenes, 1 mm vastagságú fedőlap figyelhető meg. Ez és a fedőlapok felett, illetve alatt található fél-fél sorok az egyenletes eloszlást segítik elő. Így feltételezhető, hogy a vizsgálat eredménye teljes mértékben a szerkezet teherbírásra fog rámutatni.

A 3. táblázatban jól látható minden egyes próbadarab jelölése és a köztük rejlő különbségek. A kép szemléletesen is megmutatja, hogy melyik két falvastagság változtatásával képeztem a különböző darabokat, a mellette lévő adatok pedig pontosan leírják, melyik esetben mekkora vastagsággal rendelkeznek az egyes alkotók.

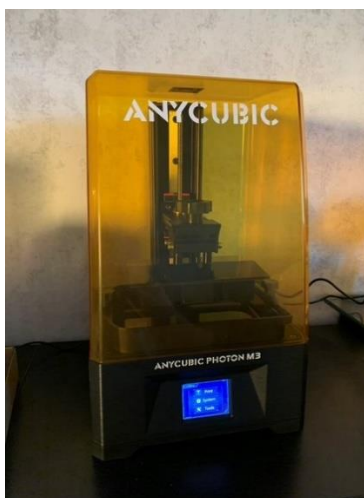
	Jelölés	A mérete	V mérete
	A0,5V0,5	0,5 mm	0,5 mm
	A0,5V0,75	0,5 mm	0,75 mm
	A0,5V1	0,5 mm	1 mm
	A0,5V1,25	0,5 mm	1,25 mm
	A0,75V0,5	0,75 mm	0,5 mm
	A0,75V0,75	0,75 mm	0,75 mm
	A0,75V1	0,75 mm	1 mm
	A0,75V1,25	0,75 mm	1,25 mm
	A1V0,5	1 mm	0,5 mm
	A1V0,75	1 mm	0,75 mm
	A1V1	1 mm	1 mm
	A1V1,25	1 mm	1,25 mm
	A1,25V0,5	1,25 mm	0,5 mm
	A1,25V0,75	1,25 mm	0,75 mm
	A1,25V1	1,25 mm	1 mm
	A1,25V1,25	1,25 mm	1,25 mm

3. táblázat: A különböző munkadarabokon végzett változtatások

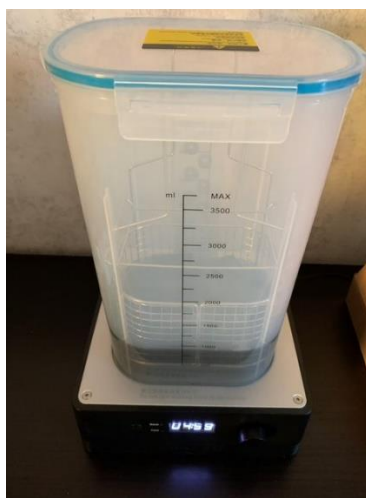
A 3D nyomtatás menete

Az alakadás menete a már ismertetett módon, M-SLA módszerrel ment végbe. Ehhez egy Anycubic photon M3 -as gépet (16. ábra) használtam, illetve az Anycubic Wash and Cure 2.0 gépet (17. ábra) alkalmaztam mosáshoz, illetve keményítéshez, azaz az utómunkáláshoz.

A próbadarabok az Anycubic saját standard gyantájából (18. ábra) készültek, mely fekete színű. Az anya szakító szilárdsága 40 Mpa átlagosan. [17]



16. ábra: Az
Anycubic Photon
M3 nyomtató



17. ábra: Anycubic
Wash and Cure 2.0
gépet



18. ábra: Anycubic
gyanta

A nyomtatás előtt a megfelelő paramétereket be kellett állítani. Ehhez a nyomtató saját a programját, az Anycubic photon workshop-ot használtam. Ahhoz, hogy ez a program értelmezni tudja a modelleket először a Solid Edge program fájljából „STEP” vagy „STL” formátumba át kellett konvertálni. Miután ez megtörtént, a nyomtató programja is könnyedén tudja értelmezni a modelleket, így a nyomtatási beállítások könnyedén elvégezhetőek voltak.

Először a megfelelő nyomtatót kell kiválasztani a programon belül, majd ezután a gyanta kiválasztása következett. Mivel egy hagyományos Anycubic gyantát használtunk a nyomtatáshoz, így a kiválasztás és a tulajdonságok megadása egyszerű feladatnak bizonyult. A gyantát nem csak a könnyű beállítás miatt választottam, ugyanis a gyártó honlapján található információk szerint megbízható a nagy pontosságot igénylő prototípusok gyártásához. Erős kötési szilárdsággal rendelkezik, melynek köszönhetően könnyedén leválasztható a tárgyasztalról, illetve alacsony viszkozitása miatt a nyomtatás befejeztével könnyedén takarítható a készülék és az elkészült munkadarab is. Ezen gyanta

alkalmazása során készült munkadarabok alakváltozás és minőségvesztés nélkül tárolhatók, alkalmazhatók [18]

Következő a lépéseként el kellett helyezni a nyomtatási területen az alakadásra szánt modellt. Erre három féle lehetőség adódik a programon belül:

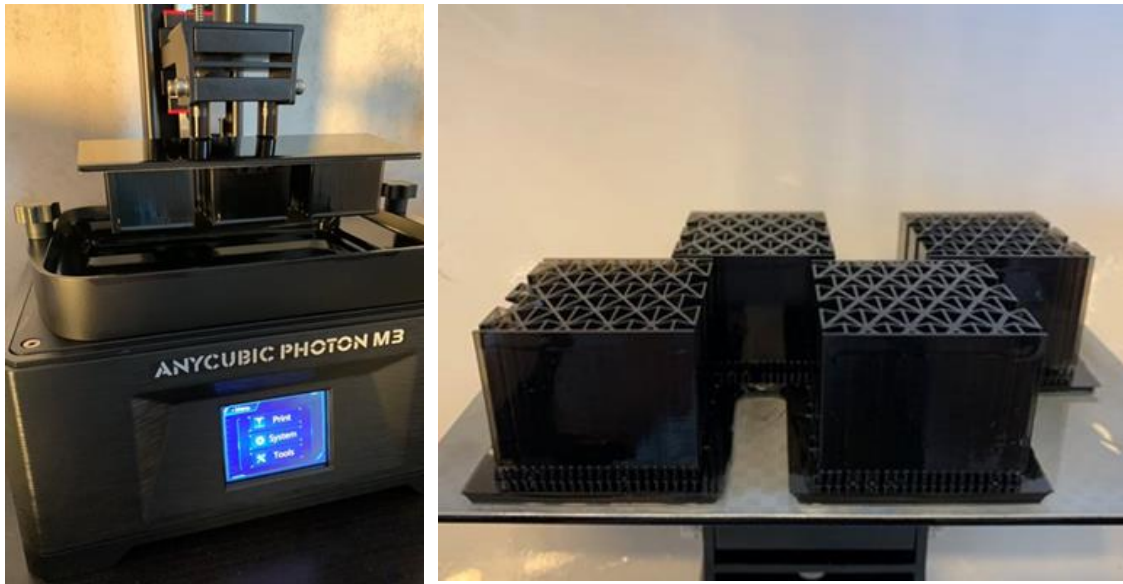
- egyből az asztalra nyomtatódjon,
- vagy alátámasztással nyomtatódjon.

Az egyből az asztalra való nyomtatás során tökéletes darabot kaphatunk, minimális elefánt talpasodással az első egy-két réteg magasabb expozíciós ideje miatt. A munkafelületről való leválasztás során azonban könnyedén sérülhet a nyomtatott test, ami a későbbi vizsgálat vagy alkalmazás megghiúsulását jelentheti. Ezen beállítás hátránya még, hogy a vizsgált mintadarabok és az építő platform által együttesen kialakított zárt térrészekben benn marad a gyanta, aminek csak egy kis része nyerhető vissza, így jelentős gyantavesztéssel jár.

A mintadarabokat az építő platformtól 4 mm-re helyeztem el a támaszolás végett.

A támaszolás választása esetén beállíthatjuk a támaszrudak vastagságát és sűrűségét. Automatikus támaszolás esetén a kevés és vékony támaszok miatt a test első rétegei nem realizálódnak rendesen. Azonban a támaszok vastagságának és sűrűségének 100 %-os beállításával hibátlan nyomtatást kaphatunk, és a gyanta sem ragad be az egyes hézagokban. A támaszok és a mintadarabok eltávolítása könnyedén megtörténhet, így a kész darab nem ronszolódik. A támasz és a talp sajnos anyagvesztést jelent ez esetben is.

A beállítások lehetőségei közül én a vastag támaszrudakkal történő nyomtatást választottam. A programban számos lehetőség van a nyomtatás személyre szabására. Be lehet állítani akár a munkadarab dőlésszögét is, illetve egyszerre akár több munkadarab nyomtatása is lehetséges. Ekkor jelent nagy segítséget, hogy a program virtuálisan elénk tárja a nyomtató munkaterét, melyen elhelyezhetjük a virtuális modelleket. Így teljes mértékben optimalizálni tudjuk a nyomtatás menetét.

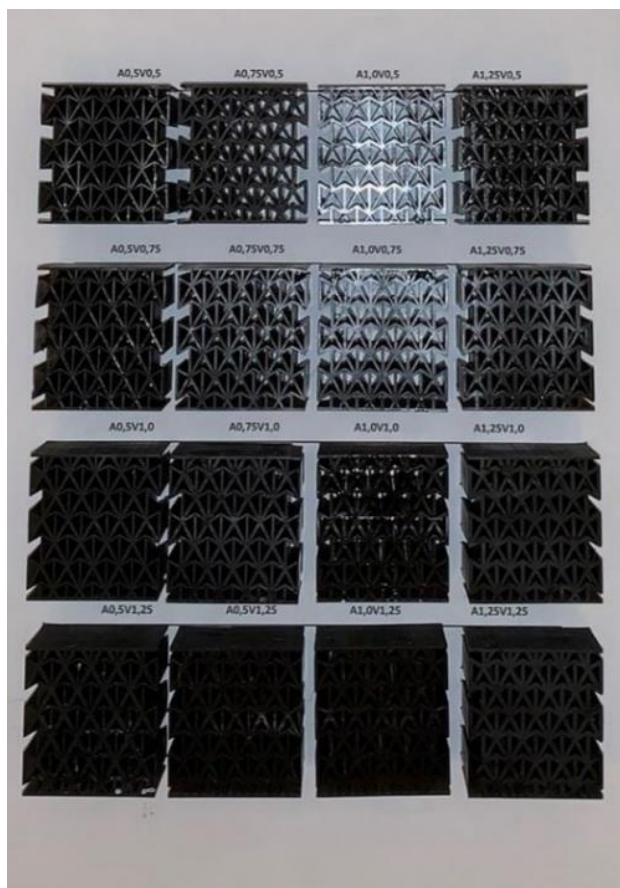


19. ábra: A nyomtatás menete és elrendezése

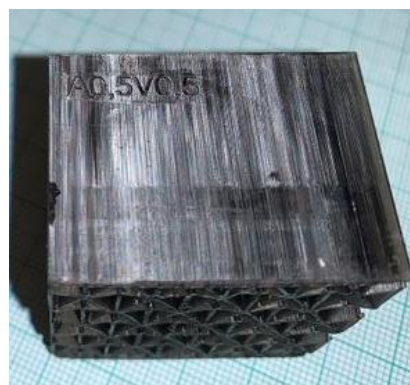
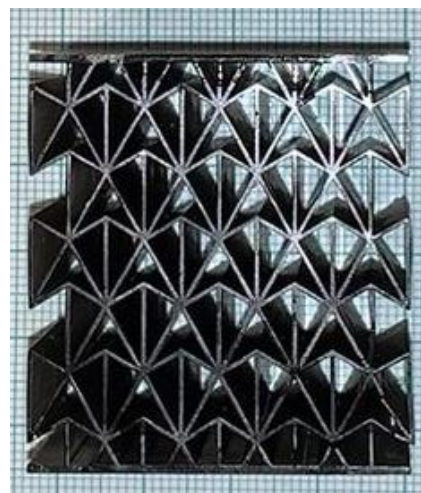
A nyomtatás során én egyszerre 4 próbadarabot nyomtattam, melynek elhelyezése a 19. ábrán látható. Szintén ezen a képen jól látható még a támaszok kialakulása is.

A modell leválasztása egy kaparóval történt, hogy ne sérüljön meg a munkafelület. Ezen művelet elvégzése közben nem csak a nyomtatott darab épségére kell vigyázni, hanem a saját magunk egészségére is. Az esetlegesen pattanó gyanta darabok ellen védőszemüveget, a veszélyes anyagok érintkezése, éles peremek elleni védelem miatt pedig kesztyűt viseltem az eltávolítás során.

A felesleges tartók eltávolítása után a mosás következett. Az ehhez használt Wash & Cure 2.0 tartály használata nagy segítség, hiszen ez által minimalizálódott az érintkezés a nem megkeményedett gyantával. A mosót Izopropillal töltöttem fel, majd 10 percen keresztül, több helyzetbe állítva mosattam. A mosás befejeztével hagytam lecsöpögni, megszáradni a darabokat. Eközben a tartályt átállítottam UV keményítésre, és elvégeztem az utólagos keményítést.



20. ábra: A 16 munkadarab



21. ábra: Az A0,5V0,5-ös
darab

A 20. ábrán láthatóak az elkészült munkadarabok, először mind a 16 darab egymás mellett, majd a A0,5V0,5 -ös jelű munkadarab felülről és oldalról nézve (21. ábra).

VIZSGÁLATOK, EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

Vizsgálati terv készítése

Mint már említettem, a vizsgálatok során a kiválasztott geometria több változatát teszteltem zömítéssel vizsgálatokkal. A vizsgálat célja, hogy megállapíthassam, hogy a különböző módosítások hogyan befolyásolják a vizsgált Lattice szerkezet nyomó terheléssel szembeni ellenállását.

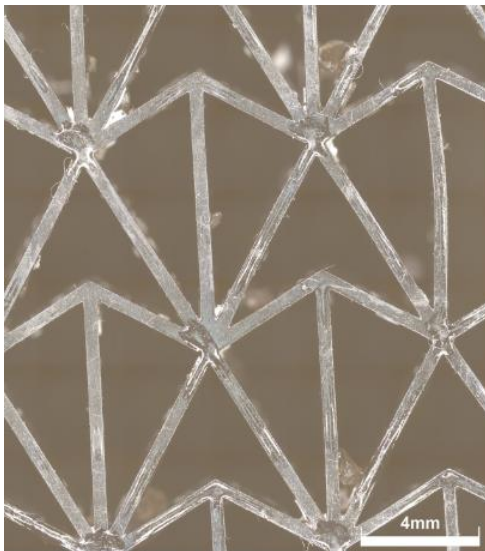
A roncsolásos vizsgálat elvégzése előtt egyéb vizsgálatokat is elvégeztem, hogy minél több információt gyűjtssek a későbbi elemzéshez.

A vizsgálatok menetrendje a következőképpen alakul:

1. Mikroszkópos vizsgálat
2. Tömegmérés
3. Zömítéssel vizsgálat
4. Eredmények összegyűjtése, kiértékelése

Mikroszkópos vizsgálat

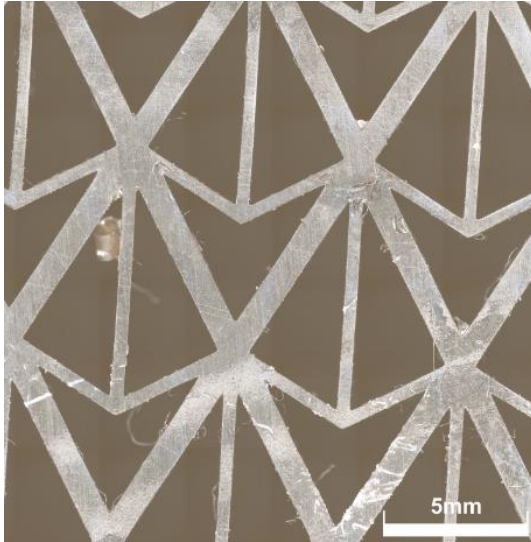
A mikroszkópos vizsgálatot egy Olympus DSX1000 típusú mikroszkóppal végeztem. Ezen mérés segítségével a nyomtatás pontosságáról nyertem információt. Ellenőrzés képen az A0,5 jelű próbadarabok méretéről készítettem egy mérést, mely során a készített képeket a következő, 22. ábra mutatja be.



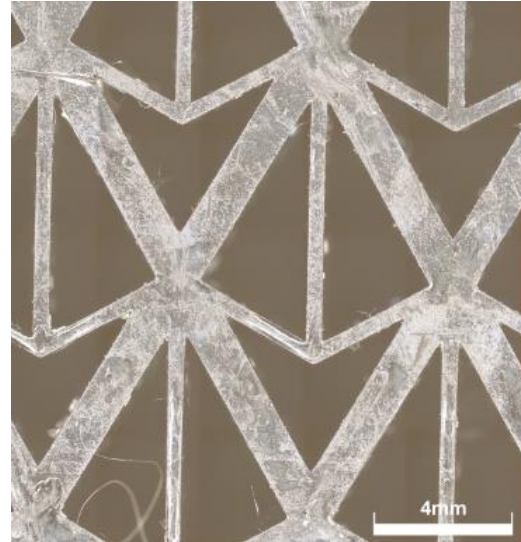
a) A0,5V0,5



b) A0,5V0,75



c) A0,5V1



d) A0,5V1,25

22. ábra: A mikroszkópos vizsgálatok során készült fotók

A vizsgálat során megállapíthattuk, hogy az alakadási folyamat során a munkadarabok kis mértékű zsugorodást szenvedtek. Ez a zsugorodás egyenletes volt, így nem befolyásolja a többi mérés elvégzését, eredményességét, nincs szükség kompenzációra.

Tömegmérés

A tömegmérés során egy Mettler Toledo AB204-es digitális analitikus mérleget használtam, mely a 23. ábrán is látható. Ez a műszer 4 tizedes pontossággal képes meghatározni a mérőtálcára helyezett anyag, tárgy tömegét.



23. ábra: A tömegmérésre használt eszköz

Az általam készített munkadarabok súlya a 4. táblázatban található.

Jelölés	A mérete [mm]	V mérete [mm]	A próbatestek tömege [g]
A0,5V0,5	0,5	0,5	17,3637
A0,5V0,75	0,5	0,75	19,9485
A0,5V1	0,5	1	23,6811
A0,5V1,25	0,5	1,25	26,6291
A0,74V0,5	0,75	0,5	21,4849
A0,75V0,75	0,75	0,75	24,4902
A0,75V1	0,75	1	27,1212
A0,75V1,25	0,75	1,25	29,8055
A1V0,5	1	0,5	25,7523
A1V0,75	1	0,75	28,7895
A1V1	1	1	31,4944
A1V1,25	1	1,25	34,3781
A1,25V0,5	1,25	0,5	30,2039
A1,25V0,75	1,25	0,75	32,9429
A1,25V1	1,25	1	35,8191
A1,25V1,25	1,25	1,25	38,2533

4. táblázat: A próbatestek tömegmérésének eredményei

A tömegmérések eredményét a zömítés során kapott eredményekkel fogom összevetni, a komplexebb értékelés végett.

A zömítéses vizsgálat menete, leírása

Az anyagvizsgálati lehetőségeket több nagyobb csoportba oszthatjuk, rangsorolhatjuk. Ezek közül a zömítés a roncsolásos anyagvizsgálatok közé, azon belül pedig az alakíthatósági vizsgálatok közé tartozik. A vizsgálat során a próbatestet egyenletes terhelésnek teszik ki, egyenletese préselik össze. Egy alakíthatósági vizsgálat során a fő kérdés az, hogy a vizsgált anyag megtartja-e alakváltozásait a rá ható erők megszűnése után is. Egy anyag annál jobban alakítható, minél nagyobb a magasságcsökkenése, úgy, hogy közben repedésmentes marad a próbatest.

A dolgozatom elkészítéséhez végzett vizsgálatokhoz egy ELT – Schaltschrank típusú, német Inspekt retrofit zömítőgépet alkalmaztam. A vizsgálat kezdetekor az eszköz beállítása volt az első lépés. Ennek köszönhetően a gép 5 mm / perces sebességgel nyomta össze a munkadarabokat. A mozgó fej magasságát is beállítottuk 43 mm-es kezdő

magasságra, ugyan is minden próbatest ezen magasság alatti méretekkel rendelkezik. A mérés tartamát 30 mm magasságcsökkenésben határoztuk meg. A 24. ábrán egy, a gépbe helyezett munkadarab látható a vizsgálat előtt. A mellette lévő, 25. ábrán pedig az egyetemen található zömítő berendezés látható, melyet én is használtam a mérések elvégzéséhez.



24. ábra: A zömítés előtt álló munkadarab



25. ábra: A zömítő
berendezés

A próbadarab behelyezését és a gép elindítását követően a műszer a másodperc töredékének ideje alatt folyamatosan jegyezte fel a mérési pontokat. Minden eredményt egy kis pontként értelmezett egy úgynevezett zömítési görbén, melyet a próbatestre ható erő és a magasságváltozás függvényében ábrázolt. A feljegyzett pontok adatait az eltelt idővel kiegészítve egy szöveges dokumentumként menti a gép, melyet a későbbiekben szabadon lehet alakítani, másolni.

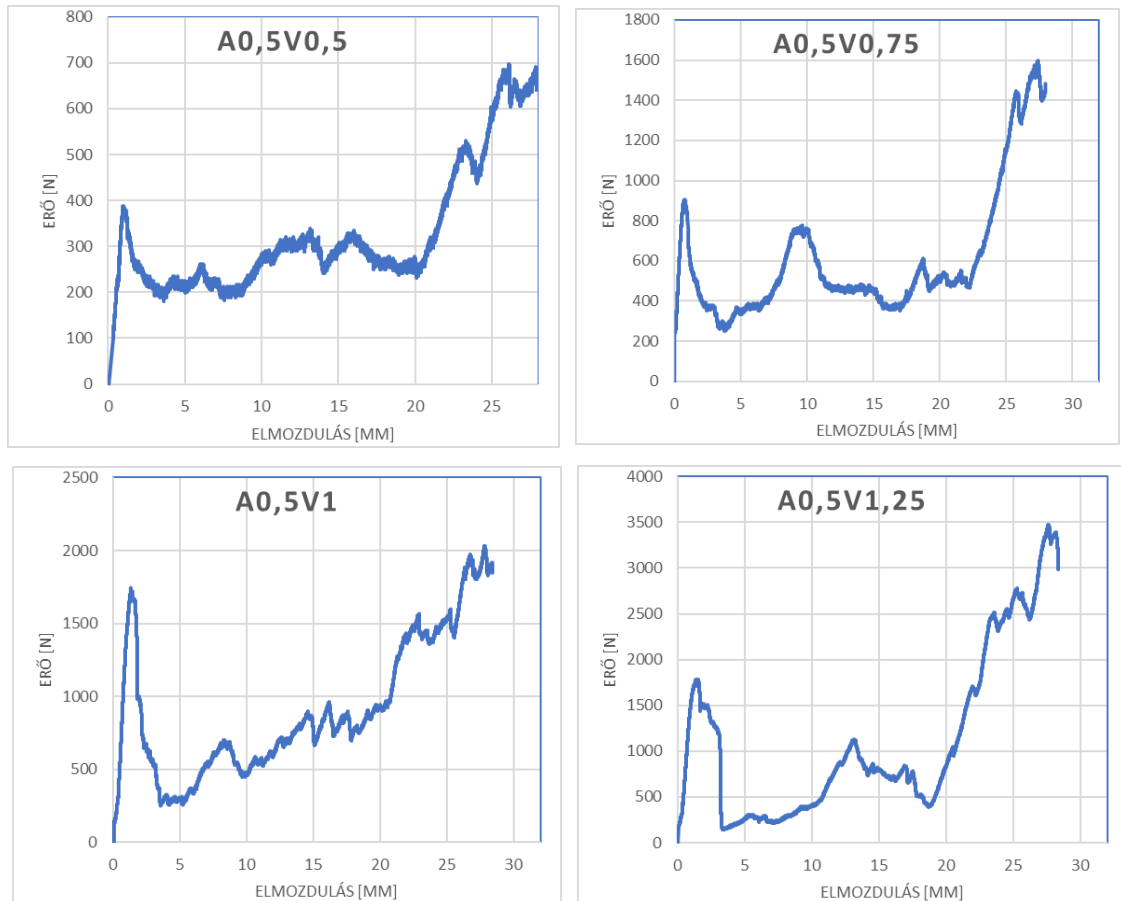
A vizsgálat menete a 30 mm deformációs terhelés bekövetkezte után rögtön megállt, és a gép felfele vette az irányt. A vizsgálat menete akkor is félbeszakadt, ha a próbatest már a 100 N terhelést sem bírja el a roncsolódás mértéke végett.

A vizsgálat menete során kapott adatok, eredmények elemzése a következő fejezetben következik.

A vizsgálati eredmények bemutatása

A műszer által felvett, vizsgálatonként mintegy 20 000 pontból álló adathalmazt az Excel táblázatkezelő program segítségével értelmeztem.

Segítségével minden egyes zömített próbadarab görbáját fel tudtam rajzolni. Ezek közül az első négy próbatest görbáját a 26. ábrán láthatjuk.

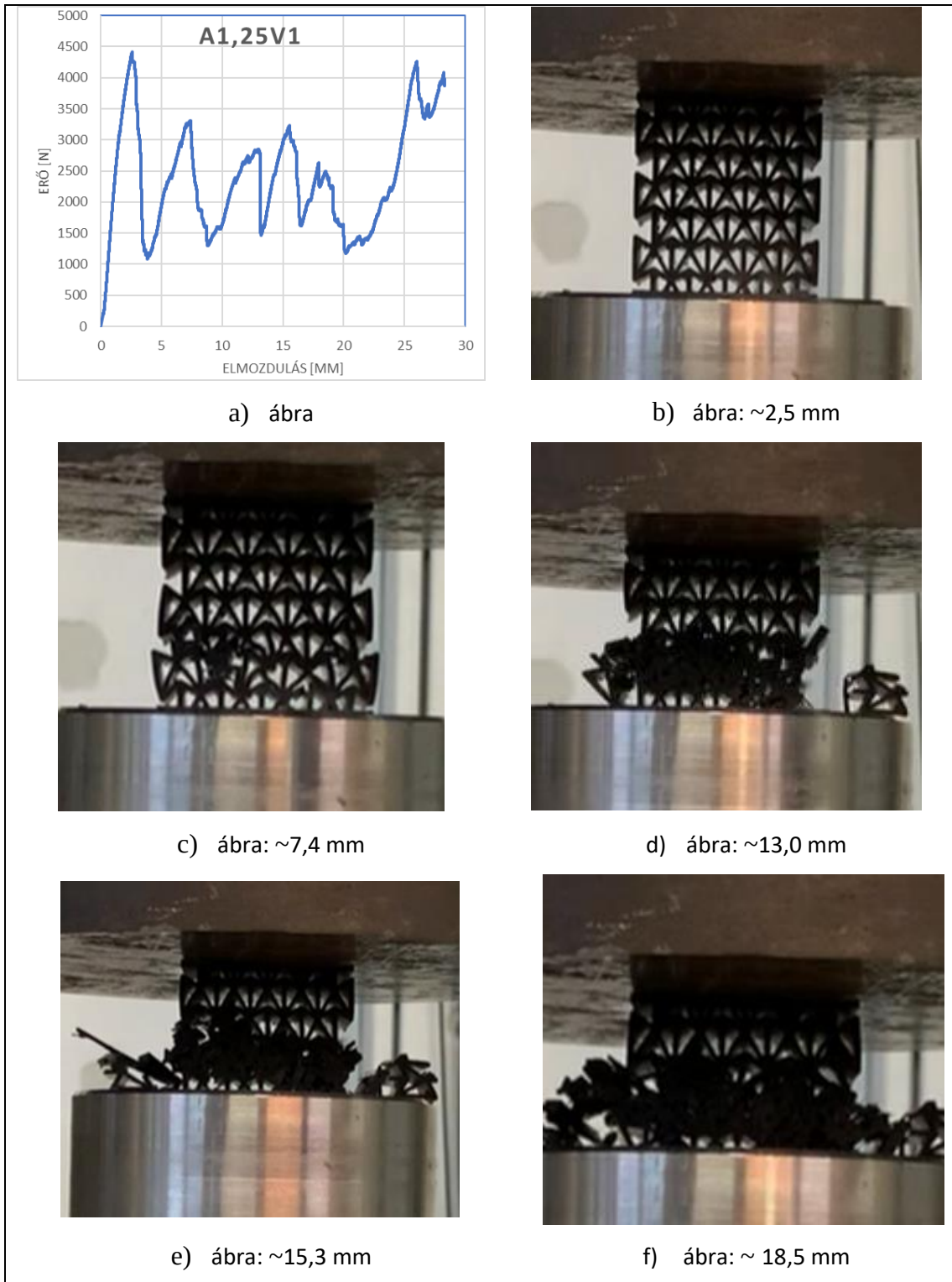


26. ábra: Az A0,5-ös jelű próbadarabok zömítési görbéi

Az előző négy görbe alapján jól megállapítható, hogy a falvastagságoktól függően a testek különböző roncsolódásokat szenvednek el és különböző mértékben képesek ellenállni a rájuk gyakorolt terhelésnek. A kezdeti szakasz minden esetben lineáris karakterisztikát mutat. Ezen négy diagram szemügyre vételével az is jól megfigyelhető, hogy a szerkezetek 5 mm deformációs terhelésen belül roncsolódnak, veszítenek terhelhetőségükből, így a görbe hirtelen zuhanásnak indul. A zömítési görbén minden egyes kiemelkedés egy lokális maximum terhelhetőséget mutat. A lokális maximumokat követő csökkenés a különböző szintek, elemi cellák deformációját, tönkremenetelét jelentik a szerkezeten belül.

Egy kiválasztott próbatest eredményének bemutatása

A próbadarabok roncsolódása szabad szemmel is jól látható. A vizsgálatok során videófelvétel készült, hogy ezeket a változásokat jól meglessen figyelni, másodpercről, másodpercre elemezni lehessen. A következő ábrákon, az A0,5V0,5 jelű darab vizsgálata során készült képek láthatóak.



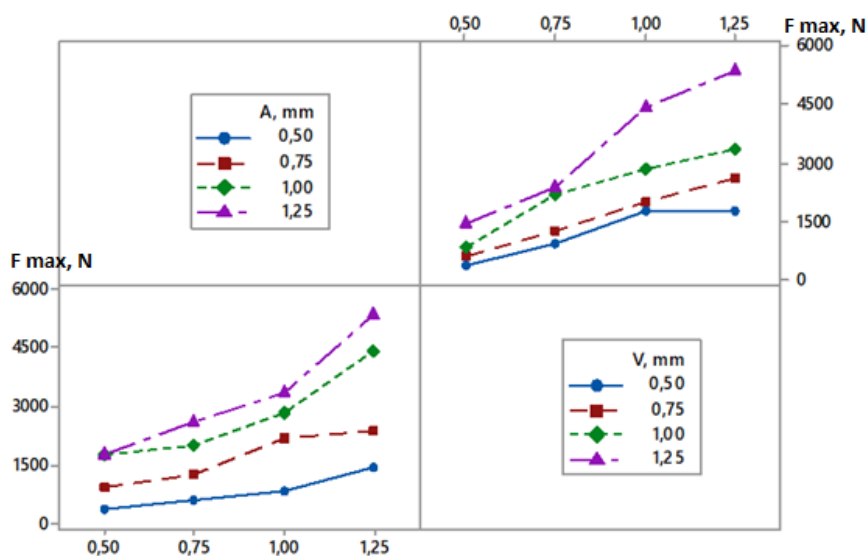
27. ábra: Az A1,25V1 jelű próbatest zömítésén készült képek

A zömítési görbe bemutatására az A1V1,25-es jelű próbatest görbáját választottam. Ezen próbadarab vizsgálata során készült görbén ugyanis jól láthatóak a terhelés lokális maximumai, mint az az a) jelű ábrán látható. A b) képen a próbatest első törési, sérülési helye látható, melyet nagyjából 2,5 mm-es magasságcsökkenés után szenvedett el. A következő képek a következő szintek deformációját mutatják. Minden egyes kép az a) jelű képen látható görbe helyi maximum terheléseivel egy időben készültek.

A 16 próbatest vizsgálata során készült adatokból, hosszas elemzés készülhet. A dolgozatom következő szakaszában az első 5 mm deformációs terhelés során bekövetkezett változások és a terhelési adatok kiértékelése következik.

A terhelés változása 5 mm magasságcsökkenés közben

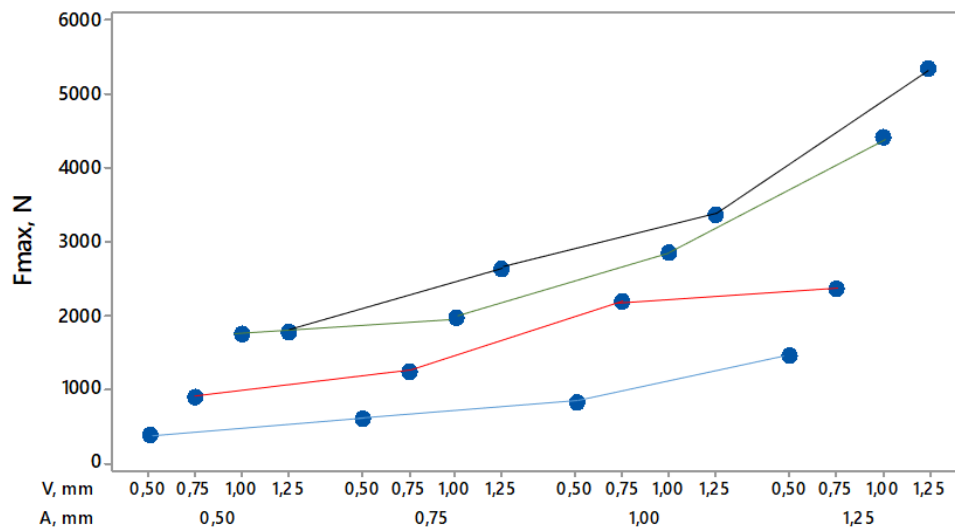
Mint azt az első négy zömítési görbe is bemutatja, a különböző falvastagságú szerkezetek, különböző módon reagáltak a terhelésekre, különböző nagyságú terhelésnek tudtak ellenállni. Ebben a fejezetben ennek törvényszerűségét vizsgálom különböző megközelítésekben.



28. ábra: A falvastagságokhoz tartozó maximális erőértékek

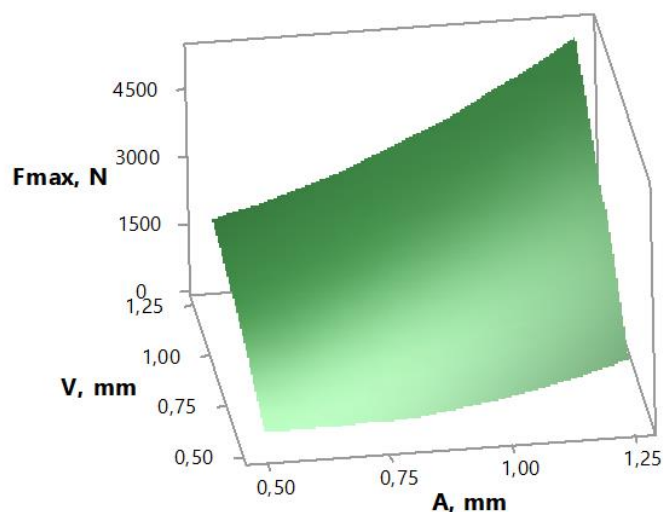
Az 28. ábrán szemléltetésre kerültek a különböző külső és belső falvastagságok, azaz az A és a V értékeihez tartozó maximális terhelések. Ezen ábra alapján jól megfigyelhető, hogy minél nagyobb a falvastagságok értéke, annál nagyobb terhelést képesek elviselni a szerkezetek. Azt is megállapíthatjuk, hogy a két falvastagság növelésével nem ugyan azt a végeredményt érhetjük el. Ez arra a megállapításra enged következtetni, hogy a kívánt terhelhetőség érdekében nem mindegy melyik változót változtatjuk.

A következő diagrammon szintén a két falvastagság méreteit ábrázoltam, azonban más megközelítés alapján.



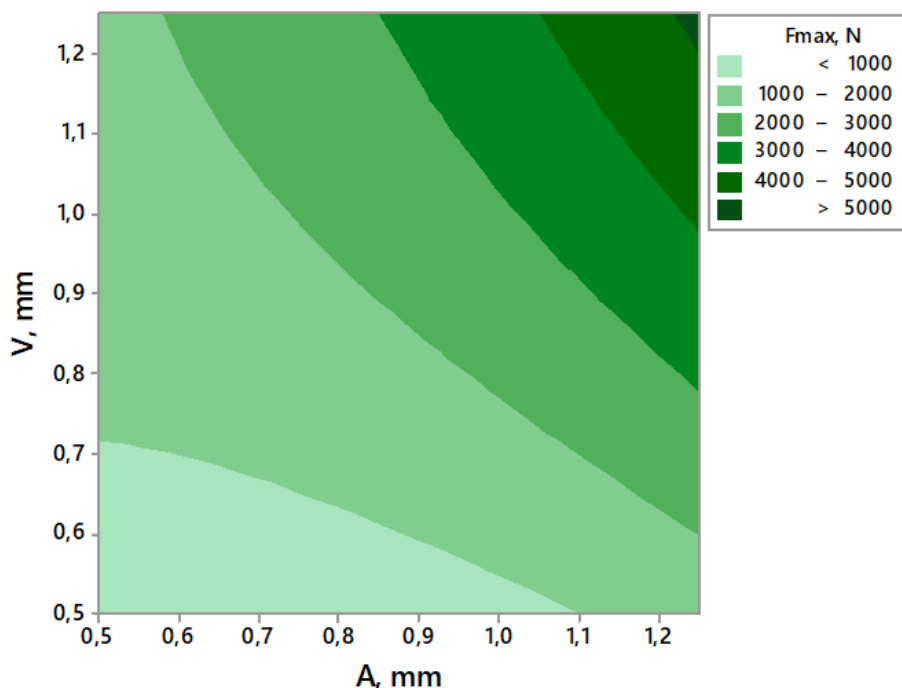
29. ábra: Az F_{max} maximális erő alakulása a falvastagságok függvényében

A 29. ábra segítségével jól megfigyelhető, hogy a belső falvastagságok növekedésével nem arányos módon növekszik a terhelés, ugyanis a különböző párosítások terheléseinek növekedése nem minden esetben írható fel egy egyenesre. Ugyan ez fogalmazható meg a külső falvastagságok változását figyelve is, melyet az ábrán lévő vonalak is mutatnak. Ez alapján megállapítható, hogy az egyes elemek terhelhetősége nem csak az egyik és nem csak a másik falvastagságtól függ, hanem a közös tulajdonságuktól. Ezt bizonyítja a következő, 30. ábra is.



30. ábra: A maximális erőértékeket bemutató ábra a kétféle falvastagság értékeinek függvényében

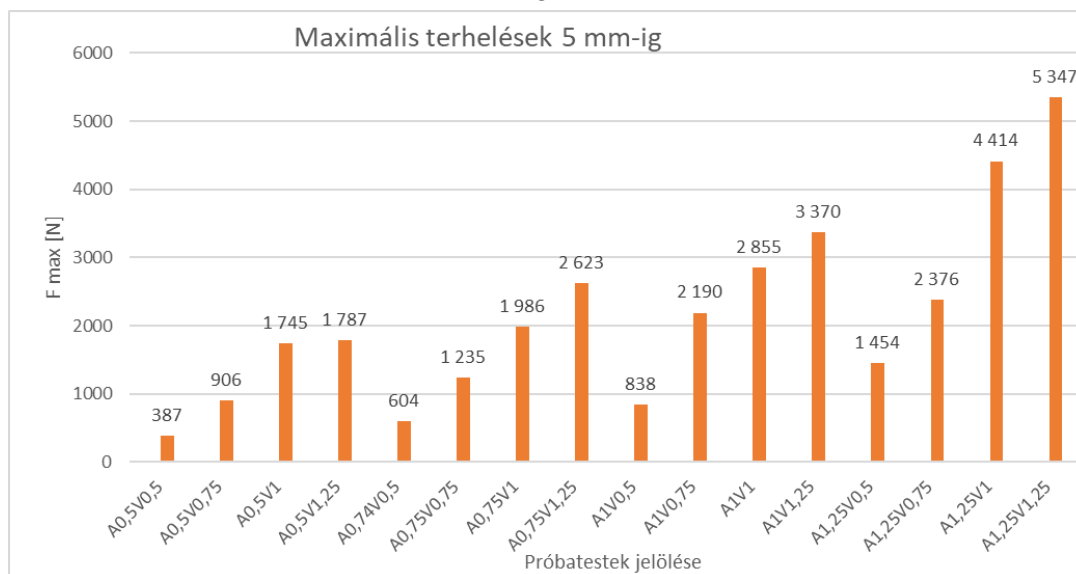
A következő ábra, az előző grafikon felülnézete.



31. ábra: Az A és V értékeinek befolyása a terhelhetőségre

A 31. ábra segítségével megállapíthatjuk, hogy a különböző falvastagságok milyen arányban befolyásolják a terhelhetőséget. Jól láthatjuk a diagramon, hogy a V 0,7 mm-es értékének eléréséig nagyobb befolyása van a V vastagságnak, mint az A vastagságnak, tehát ebben a tartományban nagyobb terhelhetőségnövekedéssel jár, ha a V értékét növeljük, mintha az A értékét. Tehát például egy $A0,6V0,6$ falvastagságú munkadarab teherbírását szeretnénk növelni az egyik fal vastagságának változtatásával, akkor az $A0,6V0,75$ nagyobb teherbírású lesz, mint az $A0,75V0,6$ jelű test. A 31. ábrán az is jól látható, hogy az oldal vastagság nagyobb értékeinek a befolyása közel egyenlő. Ez esetben a takarékoság és a súlycsökkentés alapján választhatjuk ki az értékeket. Például, ha az $A0,8V0,8$ értékű próbadarab egyik oldalát növeljük csak meg 1 mm-rel, mindkét esetben ugyanabba a sávba esik a teherbírás, de anyagsökkentés szempontjából a V értékét érdemes megnövelni, hiszen az kisebb részt képez a szerkezetben, mint az A jelű részek. Persze a pontosabb konklúzióhoz több ponton végzett mérés elvégzése szükséges.

A következő diagram alapján (32. ábra) összehasonlítható, hogy a különböző próbatestek mekkora maximális terhelést voltak képesek elviselni az első roncsolódásuk előtt.



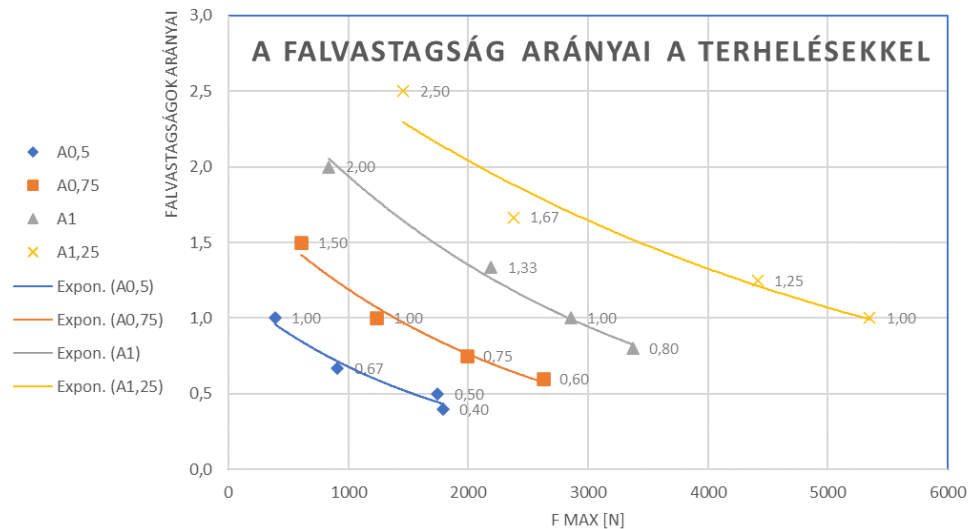
32. ábra: A próbatestek maximális terhelése 5 mm magasságcsökkenésig

A 32. ábrát megfigyelve továbbra is igaz az eddigi megállapítás, miszerint minél vastagabbak a test falai, annál nagyobb terhelést képesek elnyelni.

A következő vizsgálati szempontokhoz az 5. táblázatban szereplő adatokat használtam fel, amik nem mások, mint a falvastagságok arányszáma (A/V), illetve a próbatestek előzetesen lemerített tömegének értéke.

Jelölés	A mérete	V mérete	Max terhelés (5 mm ig)	A falvastagságok aránya	A próbatestek tömege [g]
A0,5V0,5	0,5	0,5	387,2	1,00	17,3637
A0,5V0,75	0,5	0,75	905,6	0,67	19,9485
A0,5V1	0,5	1	1744,8	0,50	23,6811
A0,5V1,25	0,5	1,25	1787,2	0,40	26,6291
A0,74V0,5	0,75	0,5	603,6	1,50	21,4849
A0,75V0,75	0,75	0,75	1235,2	1,00	24,4902
A0,75V1	0,75	1	1985,6	0,75	27,1212
A0,75V1,25	0,75	1,25	2622,8	0,60	29,8055
A1V0,5	1	0,5	838,4	2,00	25,7523
A1V0,75	1	0,75	2189,6	1,33	28,7895
A1V1	1	1	2854,8	1,00	31,4944
A1V1,25	1	1,25	3370,4	0,80	34,3781
A1,25V0,5	1,25	0,5	1454,4	2,50	30,2039
A1,25V0,75	1,25	0,75	2375,6	1,67	32,9429
A1,25V1	1,25	1	4413,6	1,25	35,8191
A1,25V1,25	1,25	1,25	5347,2	1,00	38,2533

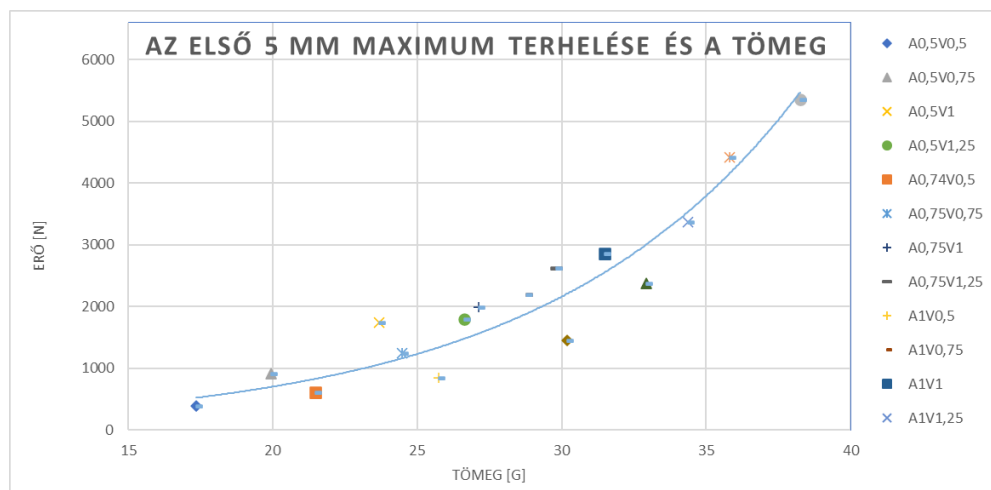
5. táblázat: A próbatestek adatai



33. ábra: A falvastagság arányai a terhelésekkel

A 33. ábrán látható diagram különböző alakzatjai a különböző munkadarabok oldalainak arányát mutatják. Egy szín egy külsővastagsággal rendelkező próbatestet jelöl. Minden egyes arányértékhez hozzárendeltem a maximális terhelési értékeket.

A diagramm jól megmutatja, hogy minden adott külső felvastagsággal rendelkező próbatest négyese közül, az képes a legnagyobb terhelést elviselni, amelyiknek a külső-belső falvastagságainak, azaz az A és V értékeinek a hányadosa a legkisebb.



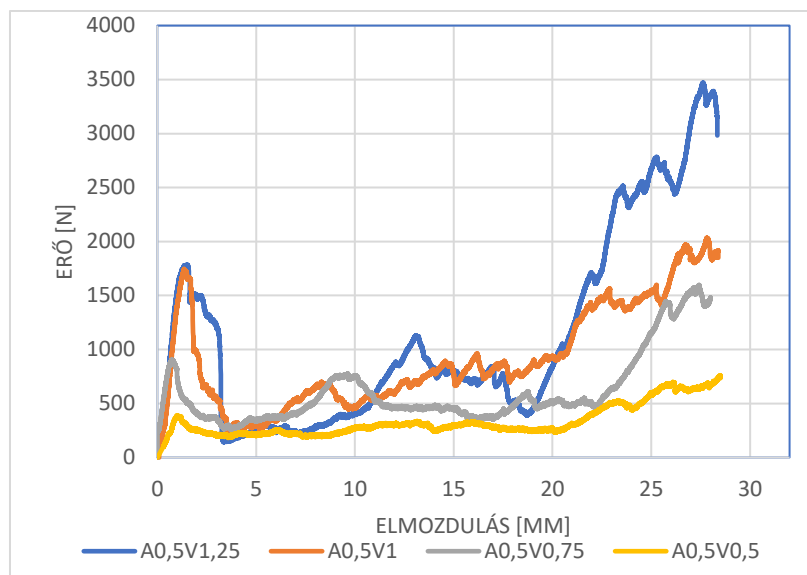
34. ábra: Az első 5 mm deformáció maximum terhelésének a testek tömegével való összefüggését mutató diagram

Az 34. ábrán látható diagram a tömegek függvényében ábrázolja a lokális maximum terheléseket. Megfigyelhető, hogy a testek tömege és terhelhetőségük nincs egyenes arányosságban, mely számunkra egy pozitív visszajelzés, mivel a struktúra paramétereit megfelelően beállítva azonos tömeg mellett kedvezőbb tulajdonságot érhetünk el, vagy ugyan azon terhelést kisebb tömegű darab is képes lehet elviselni. Ezen megállapítás

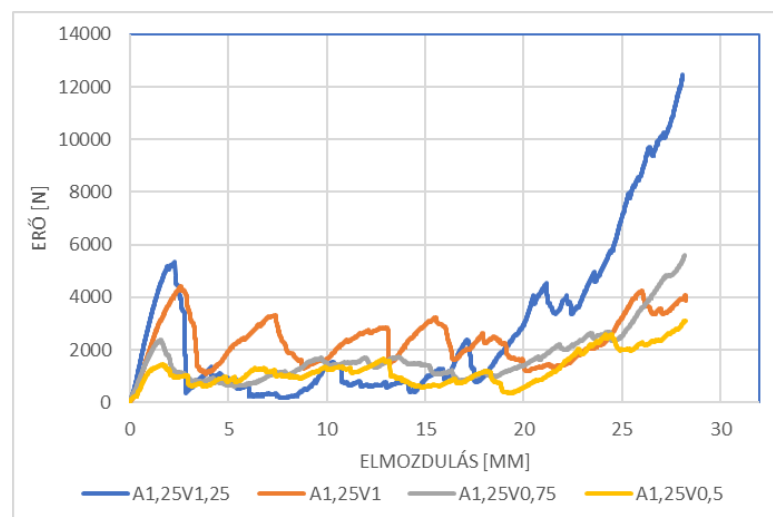
egybe esik a 31. ábrán látottakkal is. A pontokra egy exponenciális típusú függvény illesztettem, mely a fenti megállapítások fényében nem illeszkedik a pontokra, ugyanakkor az megfigyelhető, hogy a vastagsági méretek növelésével nem egyenes arányban, hanem attól meredekebbe mértékében növekszik a terhelhetőség

A terhelés változása 30 mm magasságsökkenés közben

A teljes zömítési vizsgálat 30 mm magasságsökkenés eléréséig tartott. A következő szakaszban ezen vizsgálatok közül 2 csoport teljes a zömítési ábráit mutatom be. Az átláthatóság érdekében az azonos A értékkel rendelkező próbadarabok görbéjét tettem egy diagramra. Ezek a diagrammok láthatóak a 35. és a 36. ábrán.



35. ábra: Az A0,5 értékű próbadarabog görbéje



36. ábra: Az A1,25 értékű próbadarabog görbéje

Ha a teljes vizsgálat képét vizsgáljuk, abban az esetben is megállják a helyüket az előző szakaszban tett megállapítások, mint ezt az előző négy ábra is mutatja.

Eredmények összefoglalása

Az általam vizsgált próbadarabok elemzésére számos információ, adat állt a rendelkezésemre, melyek a következők voltak:

- geometriai tulajdonságok;
- anyagi tulajdonságok;
- a darabok saját tömege;
- teherbírás; zömíthetőség.

A 16 különböző próbatest vizsgálatakor gyűjtött adathalmaz elemzésével sikerült több összefüggést is megállapítani az A és V jelű falvastagságok méretei között. Ezek az összefüggések a következők:

- A különböző falvastagságok különböző képen befolyásolják a terhelhetőséget;
- A különböző falvastagságok növelése nem okozza egyenes arányosságban terhelhetőség növekedését;
- 0,7 mm-es falvastagságig előnyösebb a V jelű fal vastagságának értékét növelni.
- A két falvastagság aránya befolyásolja a test terhelhetőségét;
- Minél vastagabb a test falazata, annál masszívabb, tehát a terhelhetősége annál jobb.
- Megfelelő paraméter kombinációk mellett azonos tömeggel nagyobb terhelést felvehető szerkezetek hozhatók létre, vagy azonos terhelést képesek lehetünk kisebb tömeggel is felvenni.

A zömítési görbék vizsgálata számos szempont szerint történhet. A zömítő görbék komplexebb, teljes tartományú kiértékelése alapján a szerkezet és a paraméterek hatása jobban megismerhető.

ÖSSZEGZÉS, BEFEJEZÉS

Dolgozatomban betekintést mutattam a 3D nyomtatás legelterjedtebb, legkedveltebb technológiáiba. Bemutattam az alakadási technikák előnyeit, hátrányait és alapanyagait. Dolgozatom első felében igyekeztem bemutatni, hogy a gyártástechnológia ezen része, milyen gyorsan és mekkora mértékben fejlődött, hiszen ezek nélkül az eljárások nélkül nem beszélhetnénk a precíz, mikro szerkezetekről vagy akár a sejtnyomtatásról sem.

Egy vizsgálat elvégzését számos kisebb munkát előzi meg, hogy sikeresen eredményeket tudjunk megállapítani. Nincs ez másként egy egyedi tervezésű geometria vizsgálata során sem. Mindezt egy általam tervezett Lattice szerkezet tervezésétől, paraméterezésétől a létrehozáson keresztül ismertettem a méréseket megelőző lépéseket.

A Tudományos Diákköri Konferenciára szánt munkám során nem csak egy, hanem 16 féle munkadarabot készítettem el és vettem különböző mérések alá. A 16 mintadarab eltérő paraméterekkel rendelkezik, azon paraméter értékeit és olyan tartományban változtattam melyek a szerkezet terhelhetőségét növelhetik, amellet, hogy a Lattice szerkezet újszerű geometriai kialakítása ne sérüljön. A mikroszkópos vizsgálat és a tömegmérés a testek látható fizikai tulajdonságaiba engedett betekintést nyerni, míg a zömítésez vizsgálat elvégzésével a szerkezet belső, láthatatlan tulajdonságát, a terhelhetőségét vizsgálhattam. A mérések közben keletkezett számos adatból és információból releváns összefüggéseket sikerült felállítani a szerkezet falvastagságainak paraméterei és a próbadarabok terhelhetősége között.

A zömítéseket nagy deformációs terhelés mellett végeztem, dolgozatomban csak a kezdeti szakasz alapján jellemeztem a Lattice szerkezet paraméterinek hatását, azonban a teljes tartományon vizsgálva egy még komplexebb jellemzést tudok elkészíteni, ezért nem titkolt célom a vizsgálatot tovább folytatni, és a szakdolgozatomhoz további elemzéseket készíteni.

HIVATKOZÁSOK

- [1] HERVAY PÉTER, HORVÁTH RICHÁRD, KÁTAI LÁSZLÓ, MADARÁSZ ISTVÁN, MIKÓ BALÁZS, MOLNÁR LÁSZLÓ, NAGY ISTVÁN, OLDAL ISTVÁN, PAPP OLIVÉR, PIROS ATTILA, RABB LÁSZLÓ, SZABÓ ISTVÁN, TÓTH G. NÓRA, VÁRADI KÁROLY (2012). CAD TANKÖNYV, 307-316.
- [2] Magyarkuti József, Dr. Mikó Balázs, (2021/2022. tanév). Korszerű alkatrészgyártás és szerelés (BGXKA15BNE), Rapid prototípusgyártó eljárások, 3D szkennelés előadás
- [3] online megnyitva 2022.09.20.
https://www.researchgate.net/publication/236587479_Environmental_Health_and_Safety_Issues_in_Rapid_Prototyping
- [4] Balogh Bence; Kovács Péter Zoltán, Szávai Szabolcs (2019). SZIMULÁCIÓS ELJÁRÁSSAL TÁMOGATOTT 3D NYOMTATÁS; Multidiszciplináris tudományok, 9. kötet (2019), 4. sz. pp. 535-547
- [5] online megnyitva 2022.09.20.
<https://www.filamentek.hu/abs-nyomtatasa>
- [6] online megnyitva 2022.09.24.
<https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/#what-materials-are-used-for-sla-printing>
- [7] Krupa Gábor (2016). A 3D nyomtatás otthoni lehetőségei, avagy mire is használható a technológia a mindennapokban?; Journal of Applied Multimedia 3./XI./2016
- [8] online megnyitva 2022.09.24.
<https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-sla-printed-parts/>
- [9] online megnyitva 2022.09.24.
<https://www.3dnatives.com/en/difference-between-sla-and-msla-020820224/>
- [10] online megnyitva 2022.09.24.
<http://www.teszdesign.hu/3d-nyomtatasa/3d-nyomtatasa-alkalmazasi-teruletei/>
- [11] Gerendás Péter, Károly Dóra, Pammer Dávid, Kiss Rita; Egyedi kézrögzítő fejlesztése és gyártása 3D nyomtatással; Biomechanica Hungarica X. évfolyam, 2. szám
- [12] Jian Xiong, Robert Mines, Ranajay Ghosh, Ashkan Vaziri, Li Ma, Arne Ohrndorf, Hans-Jürgen Christ and Linzhi Wu; (2015) Advanced Micro-Lattice Materials
- [13] Wenjiao Zhang , Robin Neville, Dayi Zhang , Fabrizio Scarpa, Lifeng Wang, Roderic Lakes; (2018) The two-dimensional elasticity of a chiral hinge lattice metamaterial; International Journal of Solids and Structures 141–142 (2018) 254–263

- [14] Dr. János Péter Rádics and Levente Széles; INVESTIGATING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES
- [15] Richárd HORVÁTH, Vendel BARTH, Viktor GONDA, Mihály RÉGER, Imre FELDE (2021); Mechanical design, additive manufacturing and performance of equal volume metamaterials
- [16] online megnyitva 2022.09.26.
<https://www.hardheadveterans.com/blogs/reviews/hard-head-veterans-new-microlattice-helmet-pads-help-stop-head-injuries>
- [17] online megnyitva 2022.10.12.
<https://www.anycubic.com/collections/colored-uv-resin/products/colored-uv-resin-2kg>
- [18] online megnyitva 2022.10.12.
<https://resinstore.hu/anycubic-basic-resin-black-fekete-1-kg>
- [19] Magyarkúti József. Anyagvizsgálatok – roncsolásos vizsgálati módszerek, 3. Technológiai vizsgálatok