

**Felépítés elvű (additív)
gyártástechnológiák a gépészetben**



**Magyar Mérnöki Kamara
Kiadványsorozata 4.**

**Felépítés elvű (additív)
gyártástechnológiák a gépészetben**

**MMK FAP azonosító:
15/2017-GT**

Budapest, 2017. október

A sorozat szerkesztője:
NAGY GYULA
a Magyar Mérnöki Kamara elnöke

Készült a Magyar Mérnöki Kamara Gépészeti Tagozatának gondozásában,
a 2017. évi Feladat Alapú Pályázatok pénzügyi keretéből.

A kiadvány a Magyar Mérnöki Kamara tulajdona. Másolása, teljes terjedelmében való
közzététele csak a Kamara engedélyével lehetséges. Minden jog fenntartva.

Szerzők:
Borbás Lajos Dr.

Lektorálta:
M. Csizmadia Béla Dr.

Kiadó:
Magyar Mérnöki Kamara
1094 Budapest, Angyal u. 1-3.
info@mmk.hu, www.mmk.hu

ISBN: 978-615-80452-9-2

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	7
2. Betekintés a gyártástechnológiák folyamataiba	9
2.1. Hagyományos vagy alakító gyártástechnológiák folyamatainak áttekintése ...	9
2.2. Anyag hozzáadással, additív elven működő gyártástechnológiák: 3D nyomtatás, vagy AM	10
2.2.1. Bevezetés az 3D nyomtatás (AM) technológiába	10
2.2.2. A 3D nyomtatás (AM) gyártástechnológiáinak rövid áttekintése	12
2.2.2.1. LOM (Laminated Object Manufacturing: rétegelt lemezes gyártás) eljárás	15
2.2.2.2. SLA (Stereolitography) technológia	16
2.2.2.3. FDM (Fused Deposition Modeling) technológia	17
2.2.2.4. Objet-Polyjet technológia	19
2.2.2.5. SLS (Selective Laser Sintering) szelektív lézer technológia.....	21
3. A 3D nyomtatással (AM technológiák) készített termékek anyagtulajdonságai (alapanyagtól a késztermékig)	25
3.1. A 3D nyomtatás eljárásainak (AM technológiák) anyagmodellje	26
3.1.1. Objet-Polyjet technológia anyagjellemzői.....	29
3.1.2. FDM technológia anyagjellemzői.....	31
3.1.3. Az SLS technológia anyagjellemzői.....	33
3.2. Maradó feszültségek kérdése az additív gyártástechnológiák polimer termékei esetén.....	35
4. Objektum-felületek előállítása a 3D nyomtatás számára 3D szkenneléssel	39
4.1. Objektumok felületek szerinti osztályozása	39
4.2. Felületdigitalizáló eljárások.....	40
5. Felépítéses technológiák gyártási eljárásainak hatása a terméktervezés folyamatára	43
5.1. A funkcióstruktúrák felállítása.....	46
6. Felhasznált irodalom.....	47

7. Ajánlott szakirodalom.....	49
8. Információs anyagok, adatbázisok, elérhetőségeik.....	50
Mellékletek.....	51

1. Bevezetés

A terméktervezés, majd az ezt követő a gyártási folyamat tekintetében a felépítéses (additív) gyártási technológiák térhódítása új fejezetet nyitott. A termékek tetszőleges szempont szerint optimalizálva (irányfüggő, egyedi, terhelési körülményekhez igazított, a szerkezet viselkedésére jellemző tulajdonságok létrehozása) egyedi gyártásban készülnek – legyen szó polimerről, fémes szerkezeti anyagról, esetleg kompozitról – amely folyamat nélkülözi a hagyományos gyártási eljárások szerszámozással kapcsolatos kiadásait, így a termék a nyomtatási folyamatot követően használatra kész. A különféle elven működő berendezések bekerülési költségei ugyan jelentősen magasabbak a hagyományos, anyagleválasztás vagy anyagformázás elvén dolgozó technológiáknál, azonban a testreszabott egyedi gyártás lehetőségéből adódó előnyök képesek a gyártási költségekből adódó hátrányok kiegyenlítésére. A termékek tervezéséhez, valamint gyártásához szükséges anyagmodell meghatározásakor számolnunk kell a nyomtatási iránytól függően változó anyagi jellemzőkre – elsősorban annak következményeként, hogy az eljárások jelentős, koncentrált hő-bevitel elvén olvasztják össze az alapanyag részecskéit, - amelyek az ortotróp anyagmodellek alkalmazásával írhatók le.

Jelen kiadvány célja az *anyag hozzáadásával dolgozó (AM)*, a szakmai megnevezésekben többnyire *felépítéses gyártástechnológiának* nevezett, mindennapi életünkben *3D technológiának, vagy 3D nyomtatásnak* hívott gyártási eljárásban rejlő lehetőségek rövid áttekintése, az egyes eljárások műszaki sajátosságainak, működési elveinek bemutatása. A továbbiakban jelen bekezdésben alkalmazott megnevezések közül a *3D nyomtatást* fogjuk használni, zárójelen - ahol ez indokolt - utalni fogunk az anyaghozzáadás hangsúlyozásának fontosságára (*AM*), annak előrebocsátásával, hogy a *3D nyomtatás* használata - bár szűkíti a eljárás technológiai lehetőségeit -, a köznap életben jelentős beágyazódással rendelkezik.

A 3D nyomtatás gyártástechnológiája a gépészeti gyakorlatban napjainkban válik általánossá, így korszerűségéhez, egyre szélesebb körű, egyre újabb és újabb területek érintő alkalmazásához és alkalmazáshatóságához nem fér kétség.

A 3D nyomtatás gyártástechnológiai (anyag hozzáadásával dolgozó eljárások) alapjaiban módosítják a tervezés, gyártás, ellenőrzés hármasának a gépészeti gyakorlatban betöltött szerepét. A tervezés folyamatában annak kezdetekor ismerni szükséges a tervezett termék megvalósításának lehetőségeit, hiszen ezen új technológia által egy lépésben megvalósítható a funkciók alapján elkülönülő, több alkatrészből álló részegységek egy munkafázisban történő elkészítése is.

Ez utóbb említett tény alapvető hatással lesz a terméktervezés folyamatára is, hiszen annak funkcióanalízis szakaszában az egyedi alkatrészekben történt gondolkodástól eltérő tervezésméleti megközelítések szükségesek a működőképes részegységek egy nyomtatási fázisban történő létrehozásának lehetőségével.

2. Betekintés a gyártástechnológiák folyamataiba

Gyártási folyamaton azon műveletek, tevékenységek összességét értjük, amelynek során a gyártás tárgyát képező anyagból (anyagokból) azok alakjának és tulajdonságának (tulajdonságaiknak) megváltoztatásával terméket állítunk elő.

2.1. Hagyományos vagy alakító gyártástechnológiák folyamatainak áttekintése

A gépipari gyártástechnológiák osztályozását több szempont szerint is elvégezhetjük [1]. Megkülönböztetünk alakító technológiákat, melyek fizikai elvük alapján forgácsolással alakítanak és így adják meg a szerkezeti elem végső alakját, valamint forgácsolás nélküli eljárással alakot adó technológiákat (ilyenek a hideg és meleg képlékeny alakítások).

A gyártástechnológiai eljárások más szempontok szerinti csoportosítása is lehetséges [2]. Az egyes gyártási folyamatok elemeit tekintve megkülönböztethetünk előgyártást, mely folyamat eredménye az elő-gyártmány. Ebben a folyamatban beszélhetünk öntési, sajtolási, vagy akár anyagleválasztással dolgozó eljárásról, mint pl. kivágás és darabolás. Ezt a fázist követi az alkatrészgyártás, amely a hagyományos technológiák esetén a tervezési adatok figyelembevételével valamilyen anyagleválasztási elv alkalmazásával valósul meg. Az így elkészített alkatrészekből állítjuk össze szereléssel a kész alkatrészt, vagy akár az önálló működésre képes szerkezeti egységet (részegység).

Érdemes még ebben a sorban megemlíteni a gyártás típusainak azt az osztályozási lehetőségét is, amely az előállított termék darabszáma alapján osztályozza az eljárásokat. Ebben a tekintetben beszélhetünk egyedi, sorozat, valamint tömeggyártásról. Néhány alapvető jellemzőt érdemes ezen osztályozási elv alapján az egyes típusokhoz hozzárendelni.

Egyedinek tekintünk egy eljárást, amelynek során soha, vagy csak ritkán ismétlődő feladatot kell megoldanunk, nagyon kis (akár egy példányos) darabszámban, feltételezhetően igen magas gyártási (gépi berendezés, emberi tudásigény) költség megvalósításával.

Sorozatgyártás esetén ismétlődő termékről beszélünk, jól meghatározható darabszám esetén megfelelő készülékezéssel és az adott folyamatra jól behatárolható tudásigénnyel a gyártási folyamat költségei optimalizálhatók, így azok az egyedi gyártáshoz képest jelentősen kedvezőbbek lehetnek.

Tömeggyártás esetén akár folyamatos termeléssel állítunk elő igen nagy mennyiségű, azonos tulajdonságokkal rendelkező terméket. Az előállítás során folyamatában rendezett, speciális eszközök alkalmazásával, igen részletes tervező, szervező eljárások egyberendezésével biztosítható, hogy a termékegységre vetített gyártási költségek az előző két eljáráshoz képest jelentősen kedvezőbben (alacsonyabban) alakuljanak. Természetesen annak eldöntésére, hogy melyik termék milyen besorolás alá esik, vagy tartozhat, a termék darabszáma alapján a szubjektív megítélésen kívül matematikai eljárással is megközelíthető, ennek bemutatása azonban nem tartozik jelen összeállítás tárgykörébe.

Az alakító gyártástechnológiai eljárások sajátja a gyártási folyamat során keletkező felesleg, ami leválasztott anyagmennyiség formájában jelenik meg. Ez az anyagfelesleg a konkrét gyártmány tekintetében veszteségként tekinthető, még abban az esetben is, amennyiben a leválasztott anyagmennyiség alapanyagként a későbbiekben ismételt felhasználásra kerül, vagy kerülhet.

2.2. Anyag hozzáadással, additív elven működő gyártástechnológiák: 3D nyomtatás, vagy AM

2.2.1. Bevezetés az 3D nyomtatás (AM) technológiába

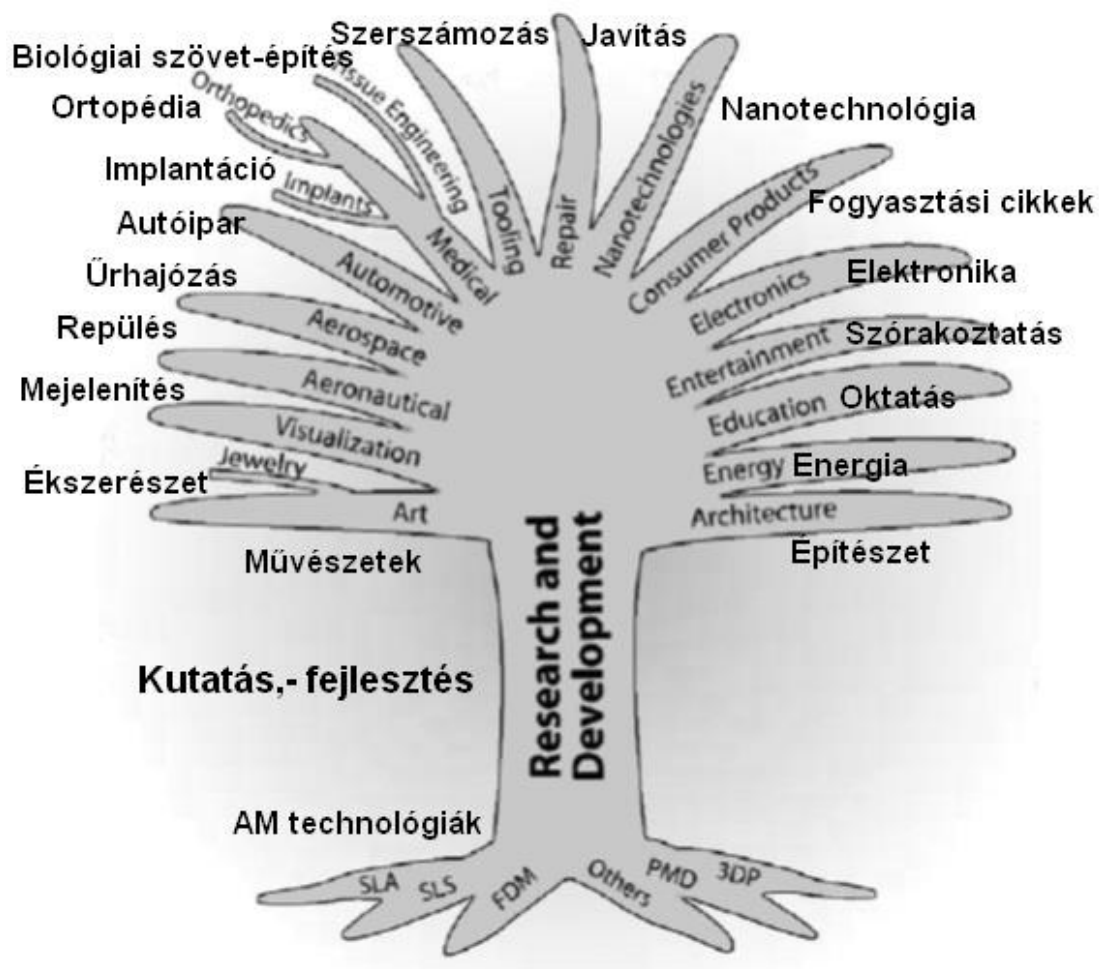
A termékek gyártástechnológiájának egy másik lehetséges eljárása az anyag hozzáadásával (additív elven) dolgozó termék előállítás. Ezen gyártási módok esetén a terméket a kívánt geometriára - különböző technológiai eljárások alkalmazásával - felépítjük, azaz nem keletkezik felesleg, vagy csak olyan minimális mértékben, amit maga az alkalmazott technikai eljárás megkövetel (támaszanyagok).

Modern, anyag hozzáadás elvén működő gyártástechnológiákról (Additive Manufacturing, AM) a sztereolitográfia megjelenésétől (1980) beszélhetünk [3]. Az azóta eltelt közel 30 esztendő alatt az eljárás mind elméletében, mind gyakorlati megvalósításában robbanásszerű fejlődésen ment át. Napjainkban életünk valamennyi területén képesek vagyunk akár polimer, akár fém alapú alkatrészek, részegységek gyártására, amely technológia, és abban rejlő lehetőségek alapvetően megváltoztatták mindennapjainkat. Az új gyártási eljárás alkalmazása alapvetően hatással van a tervezési folyamatra, a modellalkotás lehetőségeire is.

Az AM technológiák a tervezés és gyártás teljes szabadságát biztosítják gépszerkezeteink alakjának meghatározásában (gépészeti gyakorlatban ez az alakadás folyamata), a szilárdsági jellemzők terhelési körülményekhez igazíthatóságában, valamint a több alkatrészből álló egységek egy munkafázisú nyomtatásával a szerelési technológiák megváltozásával.

A tervezés folyamatában a CAD/CAM (számítógéppel segített tervezés: computer aided design, CAD; valamint számítógéppel segített gyártás: computer aided manufacturing, CAM) rendszerek egybeépülnek, számos, a gyártás helyességére vonatkozó ellenőrzési funkció beépülésével. Mindezen fejlődési folyamat eredményeként a 2010-es évek végére elmondhatjuk, hogy a kezdeti – elsősorban másodlagos célokat szolgáló burkolati, díszítő elemek, valamint különleges, látványra összpontosító megjelenéseken túl – alkalmazások után napjainkra teherviselő, az alapanyagok széles skálájából egy lépésben nyomtatható, működőképes alkatrészek, részegységek gyárthatók.

A 3D nyomtatás (AM technológiák) által gyártott termékek mindennapjaink részesei lettek, hiszen az intenzív kutatás-fejlesztés eredményeként a különböző eljárásokkal készített termékek a minket körülvevő világ legszélesebb területein – művészetektől, oktatáson, egészségügyön át a szórakozásig - fellelhetők [3].



2.1. ábra
Az egyes AM gyártási technológiák fejlesztési eredményeinek hatása mindennapi életünkre [3]

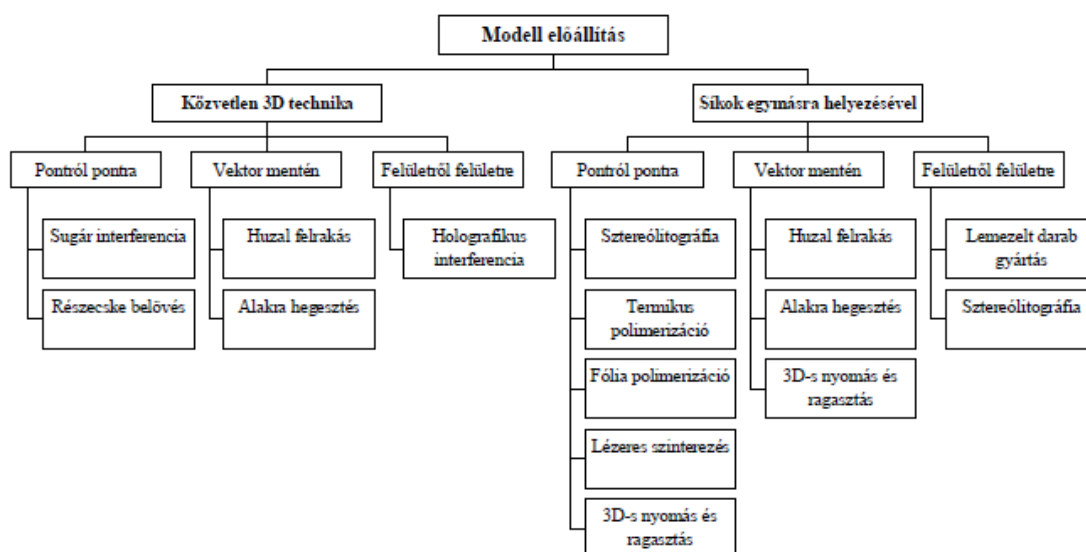
Mint a 2.1. ábrán látható, a gyártási fa gyökereiben található különböző additív eljárások által létrehozott termékek a művészetektől kezdve az orvostudományon át az oktatás, energiaszolgáltatás, építészet területéig bezárólag életünk minden megjelenésében megtalálhatók, így nem kérdéses, hogy térhódításukkal új fejezetet nyitottak a gyártástechnológiák történetében.

2.2.2. A 3D nyomtatás (AM) gyártástechnológiáinak rövid áttekintése

Az anyaghozzáadás elvének alkalmazásával megvalósított termékek iránti igény a gyorsprototípus készítés folyamatainak (rapid prototyping, RP) térhódításával vált egyre népszerűbbé, és széles körben alkalmazottá. Az alapötlet, nevezetesen a modellek rétegenkénti egymásra építéséből történő előállítás révén lehetőség nyílik bonyolult formák gyors elkészítésére. Ennek feltétele, hogy a megfelelően vékony rétegekből egymásra épülő előállított test egyes rétegeinek alakja megegyezzen (megfeleljen) a test adott magasságában a testről készített metszet kontúrjainak alakjával [4]. Az egyes rétegek kontúrjainak méreteire vonatkozó információkat háromdimenziós számítógépes test, vagy felületmodell felszeletelésével készítjük el. Minél vékonyabbak a rétegek, annál pontosabban tudjuk az elméleti modellünket megközelíteni.

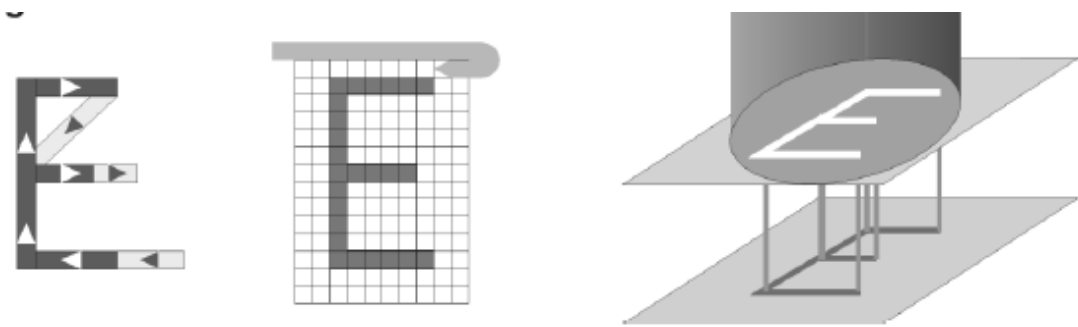
Jelen ismereteink szerint a rétegmentes létrehozásnak elve, valamint az eljárásban alkalmazott anyagok szerint számos eljárást tudunk megkülönböztetni, amelyeket összefoglalóan 2. I. táblázatban mutatunk be [4].

2. I. táblázat
A modellfelépítés elve alapján rendszerezett gyorsprototípus készítési eljárások [4]



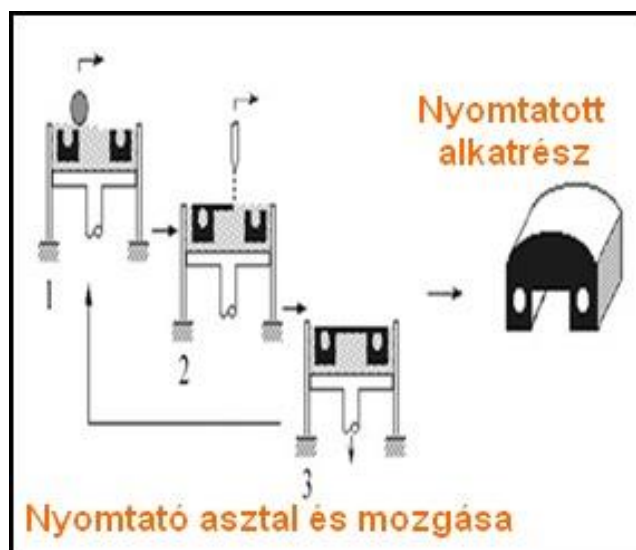
A modell előállítását valamilyen háromdimenziós programmal végezzük, melyet egy szabványos formátumban (.stl kiterjesztésű) juttatunk el a kiválasztott eljárás gyártást vezérlő programjába, ahol is megtörténik a modell felszeletelése. Ezt követően a kiválasztott eljárással - a szeletek egymásra építésével - megtörténik a modell (a tárgy) legyártása.

A szeletelt rétegek kontúrjainak előállítására alapvetően három féle eljárást alkalmazhatunk [4]. Ezek sorra: a vektoros eljárás (a kontúrt a geometriából építi fel), a raszteres eljárás (a kontúrt x-y irányban lépcsőzetes soronként építi fel), valamint a maszkos eljárás (arányosan kicsinyített maszkokból felépített kontúr) [4], amely eljárásokat a 2.2. ábra szemlélteti.



2.2. ábra
Rétegmentű kontúrok létrehozásának eljárásai [4]

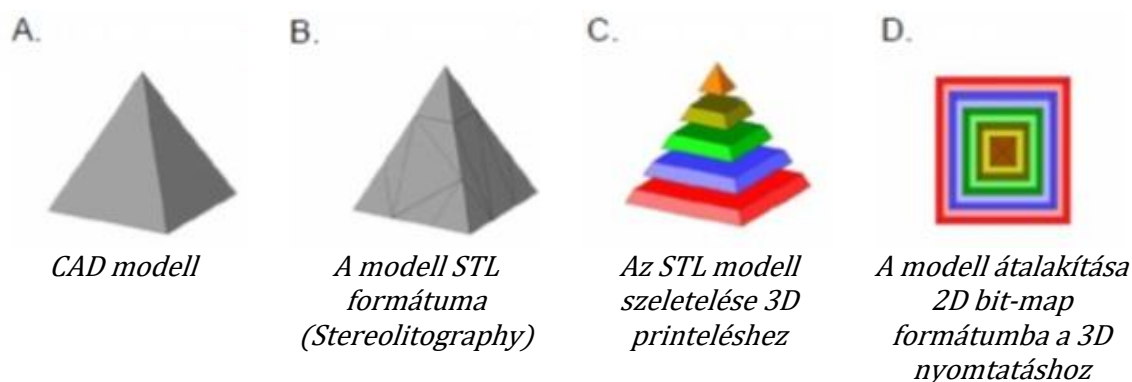
A 3D nyomtatás gyártási eljárásának alkalmazása során valamely, alkalmasan megválasztott méretű por anyag rétegenkénti felszórásával (amely a tintasugaras nyomtatás elvéhez hasonlítható), vagy egy megfelelő anyag megolvasztásával majd lerakásával egy adott szerkezet vékony, vízszintes keresztmetszeteit építjük fel [4], [5], [6], porok alkalmazása esetén 10...30 mikron vastagságú rétegek egymásra építéséből. A felépülő rétegek vastagsága tehát technológiától, gépi berendezéstől függően (az adott gyártási eljárásban specifikált) mikrométer nagyságrendben található. A nyomtatás elvét a 2.3. ábra szemlélteti [5].



2.3. ábra
3D nyomtatás elvi működése [5]

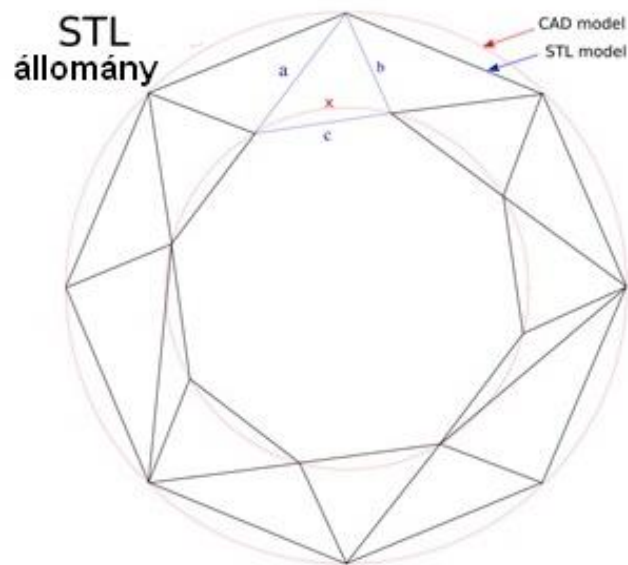
A berendezésben egy függőlegesen mozgatható nyomtatóasztalra adagoljuk a nyomtatni kívánt szerkezeti elem anyagát, amely nyomtatóasztal minden egyes réteg elkészülte után lefelé elmozdul. Minden egyes réteg a technológia sajátosságából adódóan (technológiai paraméterek megválasztása) az alatta levővel összeolvad, amely folyamat eredménye a kész nyomtatott termék (2.3. ábra jobb oldala).

Az alkatrész elkészítéséhez a tervezésnél használt CAD állományból létre kell hozni azt az STL állományt (formátumot), amely lehetővé teszi az eredeti alkatrész síkok szerinti felépítését, nyomtatását. Az STL állomány származtatását a 2.4. ábra szemlélteti [5].



2.4. ábra
Az STL (Stereolitography) állomány létrehozása [5]

Görbült felszínek esetén az STL állomány származtatását a 2.5. ábra szemlélteti, amely egyben a háromszögelés eljárás során alkalmazott geometriai jellemzők és a modell pontossága közti kapcsolatra (közelítés) is rávilágít [6].

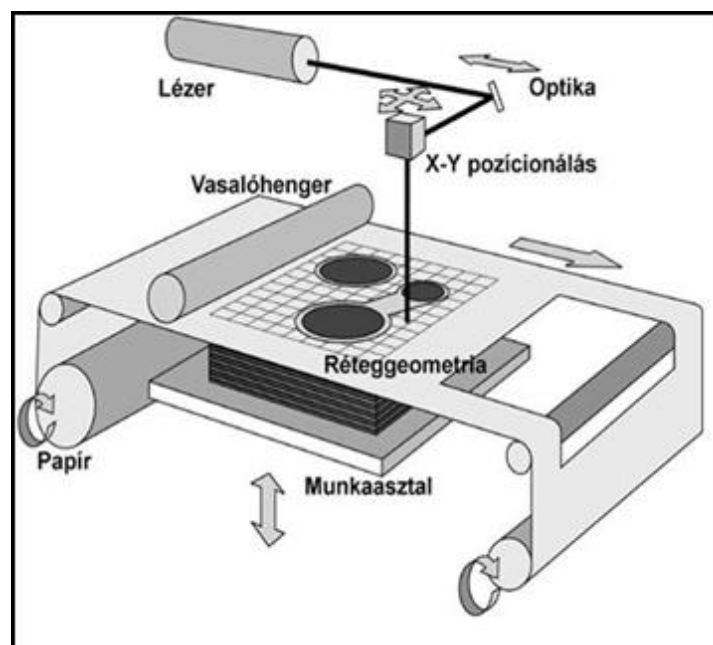


2.5. ábra
STL állomány származtatás görbült felszín esetén [5].

Az egyes ismertebb technológiákat az alábbiakban foglalhatjuk össze.

2.2.2.1. LOM (Laminated Object Manufacturing: rétegelt lemezes gyártás) eljárás

A LOM technológia elvi működését a 2.6. ábra szemlélteti [5].

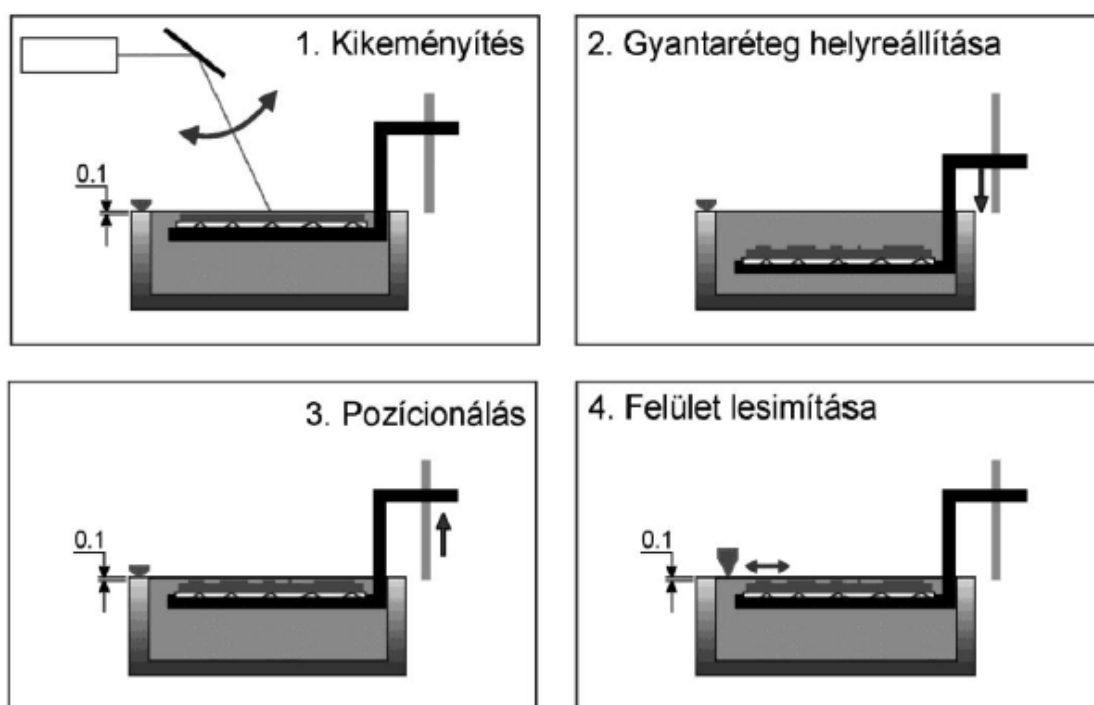


2.6. ábra
LOM technológia elvi működése [5]

Az eljárás során egy megfelelő tulajdonságokkal rendelkező szalag mozog az optikai lencserendszeren keresztül a megfelelő helyre irányított lézernyaláb előtt, amely az anyagot meglágyítja a kívánt geometriát az asztalra olvasztja. Természetesen nem csak papír alapanyagú tekercset használhatunk a gyártás során. A legelterjedtebb alapanyagok a papír mellett fém, szövet, szintetikus és kompozit polimerekből készített fóliák vagy lemezek. Az eljárás során az újonnan elkészített réteget először az előzőhöz hozzáragasztják, majd a kontúrokat lézerrel körbevágják. A ragasztás beindítására hőérzékeny ragasztót, vagy UV sugárzás hatására aktiválódó eljárást alkalmaznak. A munkaasztal függőleges irányú süllyesztése teszi lehetővé a következő réteg elkészítését, ill. így a termék előállítását.

2.2.2.2. SLA (Stereolitography) technológia

A fotopolimerizáció elvén működő eljárás a legrégebbi technológia az AM eljárások sorában. Azt a fizikai jelenséget használja fel szerkezet építésre, hogy egyes monomer anyagokban lézersugárzás hatására láncképződési – polimerizációs – folyamatot indul. Alkalmasan megválasztott (fényérzékeny) epoxi gyanta rétegenkénti polimerizációjának folyamatát a 2.7. ábrán mutatjuk be.



2.7. ábra
SLA technológia elvű működési sémája [4]

A technológia során egy speciális műgyantát tartalmazó tartályban ultraibolya lézer sugárnyaláb alkalmazásával készítjük el az alkatrészt, miközben a berendezés tárgyasztala egy réteg kikeményítését követően függőleges irányban elmozdul [4]. Az

első lépés a néhány tized mm vastagságú epoxi gyanta munkaasztalra juttatása. A következő lépésben a lézersugárzás hatására körvonala mentén a gyanta polimerizálódik. A fókuszált lézersugár nyaláb biztosítja, hogy a polimerizáció valóban csak a kontúrok mentén menjen végbe. A következő lépésben a kontúrok által körülzárt terület polimerizációja jön létre, amely biztosítja a lerakott réteg stabilitását. Az így kikeményedett (polimerizálódott) réteget már lehet egy rétegvastagságnyt lefelé elmozdítani a műgyanta fürdőbe, amely a munkaasztal lefelé történő mozgatásával valósítható meg.

Az alkatrész kikeményedését követően egy tisztító fürdőbe kerül, ahol a felesleges – pl. támaszrétegeket – eltávolítják. Ezt követően a gyanta teljes kikeményedése ultraviola megvilágítású kemencében zajlik le.

Az eljárás során alkalmazott műgyanták jellegzetes anyagtulajdonságait a 2. II. táblázatban mutatjuk be [4].

*2. II. táblázat
A sztereolitográfia eljárásával elérhető egyes anyagtulajdonságok [4]*

	epoxi1	epoxi2
Szakítószilárdság (Mpa)	46-47	59-60
Szakítási nyúlás (%)	11-22	7-19
Ütőmunka (kJ/m²)	33	27-30
Rugalmassági modulus (MPa)	1628	2920

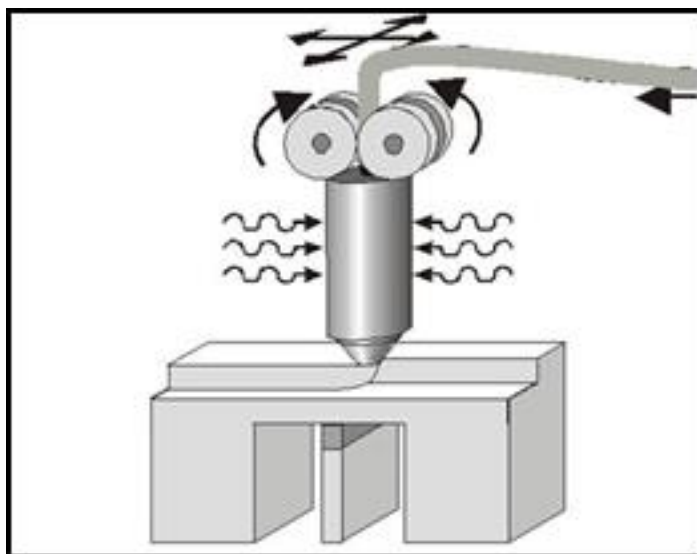
Egy jellegzetes – ezzel a technológiával előállított termék – látható a 2.8. ábrán [7].



*2.8. ábra
Jellegzetes SLA termék [7]*

2.2.2.3. FDM (Fused Deposition Modeling) technológia

Az eljárás során többnyire polimer – hőre lágyuló – huzal mozgatható tárgyasztalra történő megömlesztett lerakásával majd réteges megszilárdulásával alakítjuk ki a kívánt alkatrészt. A technológia működési vázlatát a 2.9. ábra szemlélteti [5], [8].



2.9. ábra
FDM technológia működési vázlata [5], [8]

A technológiai rendszerben a huzaladagolás valamint az asztalmazgatás sebessége, illetve a huzaladagoló és a tárgyasztal hőmérséklete változtatható. Az eljárás segítségével modellek, és működőképes prototípusok egyaránt előállíthatók. A teljes termelési folyamat – akár marketing célokra – egyszerűen bemutatható. A különböző színű alapanyagok alkalmazásával a nagyteljesítményű, stabil polimer termékek széles skálája állítható elő az FDM technológia alkalmazásával.

Az eljárás polimer alapanyagai igen széles skálán helyezkednek el, amely anyagok megtalálhatók a fröccsöntött termékek között is. Az alapanyagok többnyire márkanévvel nevesítettek, összetételük tekintetében kémia vizsgálatok adhatnak pontosabb eligazítást. Az anyagok között megtalálhatók a „ULTEM, PC-ISO, PC-ABS, Nylon, ASA, ABS” különböző termékcsaládjai. Néhány jellegzetes terméket az alapanyag megjelölésével a 2.10. ábrán adunk közre [8].



ULTEM 9085



ASA



ABSi

2.10. ábra
FDM technológiával gyártott különböző alapanyagú jellegzetes termékek [8]

Ebben a kategóriában a nyomtatók széles választéka áll rendelkezésre, az egyszerű asztali kivittől a nagyteljesítményű asztali nyomtatókig [8].

Az említett két kategóriában megnevezett nyomtatókra látunk példát a 2.11. ábrán [8].



a.) Mojo nyomtató

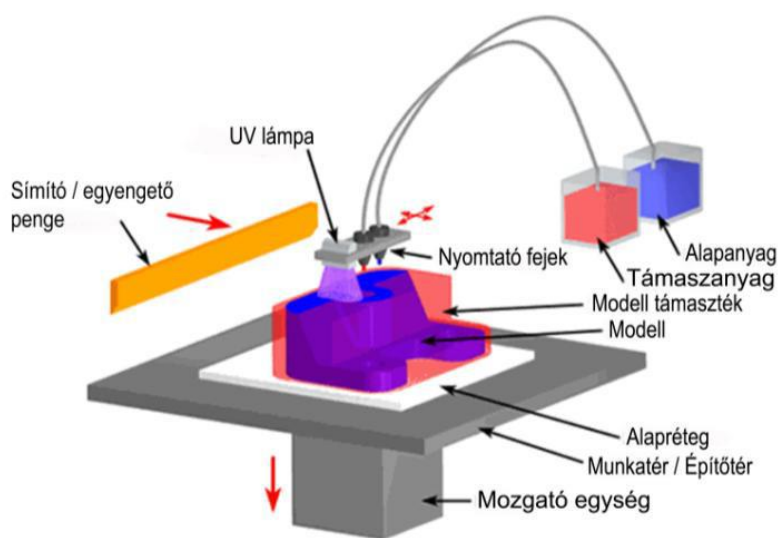


b.) Stratasys F123 sorozat

2.11. ábra
FDM technológia asztali nyomtatói [8]

2.2.2.4. Objet-Polyjet technológia

A röviden csak Polyjet technológiaként is emlegetett eljárás precíziós termékek előállítását teszi lehetővé. A nyomtatók 16 mikronos vastagsági rétegek egymásra illesztésével készítik el a termékeket, a méretpontosság 0,1 mm-en belüli. A Polyjet technológia elvi működését a 2.12. ábra szemlélteti [9].



2.12. ábra
A Polyjet technológia elvi működése [9]

Az eljárás során alapanyagként fényérzékeny fotopolimert használnak, melynek megszilárdulása (polimerizációja) UV sugárzás hatása megy végbe. Kedvező szilárdsági jellemzőkkel rendelkező termékek állíthatók elő ezzel a technológiával. Természetesen a gyártás során itt is szükséges támaszanyagok alkalmazása, amelyeket a végső termékből eltávolítva egy lépésben működőképes részegységek nyomtatásra nyílik lehetőség. Az alkalmazott technológia lehetővé teszi 16 mikrométeres nyomtatási vastagság elérését, amely igen kedvező érték. Ugyanakkor, amennyiben pl. a szerkezeti elem külső falát építik, akár 160 mikrométeres rétegek készítésére is van lehetőség. A teljes nyomtatott elem tekintetében a $\pm 0,05$ mm pontosság elérhető, ami igen kedvező értéknek számít [4].

A Polyjet technológia igen széles skálán engedi az anyagok nyomtatását, a gumiszerűektől a kemény polimerekig, sőt, egyszerre többféle anyag is alkalmazható a nyomtatóban.

A megvalósított termékek legszélesebb skáláját találjuk ebben a kategóriában. A skála az egyszerű burkolati elemektől a bio-kompatibilis termékekig terjed, melyekre néhány példát a 2.13. ábrán mutatunk [8].



a.) fogászati implantátum



b.) merev, többszínű modellanyag

2.13. ábra
Polyjet termékek [8]

A nyomtató berendezések között az asztali kivitelűtől a telepített, nagy teljesítményű készülékekig széles skálán választható eszközöket találunk. Néhány berendezésre a 2.14. ábrán láthatunk példát [8].



*Professzionális asztali
nyomtató Objet30*



*Többféle anyag színes
nyomatása: Stratasys J750*

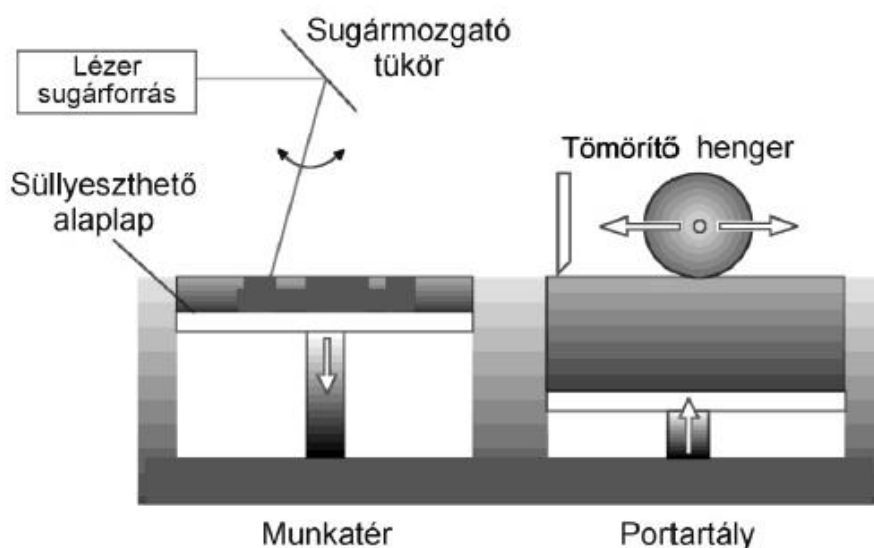


*Többanyagos összetevők
színes nyomtatására:
Objet350 Connex3*

*2.14 ábra
Polyjet berendezések [8]*

2.2.2.5. SLS (Selective Laser Sintering) szelektív lézer technológia

Az SLS eljárás során a terített porszemcsék rétegenkénti egyesítését lézer sugárnyalábbal végzik. Az eljárás alkalmas polimerek (pl. poliamid, PA), valamint fémporok egyesítésére egyaránt. Az elvi működésről a 2.15. ábra alapján kaphatunk képet.



*2.15. ábra
SLS technológia berendezés elvi felépítése [4]*

A poradagoló tartályból érkező alapanyag a lézersugár hatására megolvadt réteget képezve a legfelső réteggel összeolvad, így biztosítva az alkatrész rétegenkénti felépítését. A munkaasztal függőleges irányban lefelé, míg a portartály függőleges irányban felfelé elmozdul az egyes rétegek összeolvadását követően.

Az eljárás alkalmas a közvetlen digitális gyártásra (DDM, Direct Digital Manufacturing), amely során az elkészített, vagy rendelkezésre álló CAD modellből azonnal lehetséges valamely alkalmas gyártóeszközzön a termék előállítását [8]. Talán nem haszontalan annak ismételt hangsúlyozása, hogy ebben a szellemben készített alkatrészek, berendezések esetén a termék CAD modelljéből közvetlenül nyerjük a terméket.

Ezzel a technológiával gyártott termékek, eszközök a termék koncepciójának kialakítási fázisában - akár több szempont szerint is - elkészíthetők, kinyomtathatók, és kézbe vehetők. Miután működőképes termékek, azaz prototípusok elkészítésére is alkalmas [8], azok elemzése, akár egyszerű módosítása igen rövid időn belül megvalósítható. Néhány példát a 2.16. ábrán láthatunk olyan termékekre, amelyek mechanikai gépészeti szempontból működőképesnek tekinthetők.



*Elkészített termék a
modellalkotás fázisában*

*Gépészeti szempontból
működőképes nyomtatott termék*

*2.16. ábra
SLS technológiával gyártott termékek [8]*

A „digitális gyár” fogalmának, és gyakorlatban való alkalmazásának megteremtésével új távlatok nyílnak a termékek előállításának folyamatában. A koncepció megalkotásától a termék realizálásáig eltelt idő lerövidül, a járulékos szerszámozási, egyéb költségek megszűnnek. Egy polimer alkatrészek digitális gyártására alkalmas eszközt láthatunk a 2.17. ábrán. A technika természetesen alkalmas fém alkatrészek gyártására is, amelyek hasonló elven működő, de lényegesen nagyobb teljesítményű lézer sugárforrásokat használnak (néhány 100 W-tól kW lézer sugárforrás teljesítményig, amely meghatározza a munkatér méretét), és akár többféle fémpor egyidejű adagolására is alkalmasak. Nyomtatható fém anyagok széles skálája áll rendelkezésre, igen széles skálán elhelyezkedő szilárdsági jellemzőkkel [27].



2.17 ábra
Polimer lézer szinterező berendezés (EOS FORMIGA P 110, [8])

A fontosabb AM technológiák néhány jellemzőjét – összehasonlíthatóság céljából – a 2. III. táblázat mutatja be [4].

2. III. táblázat
AM technológiák néhány jellemzőjének összehasonlítása [4]

	SLA	SLS	FDM	3DP	POLYJET/ MÁTRIX
ELJÁRÁS BONYOLULTSÁGA	BONYOLULT	BONYOLULT	EGYSZERŰ	EGYSZERŰ	EGYSZERŰ
ALAPANYAG VÁLASZTÉK	FÉNYÉRZÉ- KENY POLIMER	FÉM, ÜVEG, MŰANYAG, BEVONATOS FÉM	HŐRE LÁGYULÓ MŰANYAGOK	FÉM, ÜVEG, KERÁMIA, MŰANYAG	FÉNYÉRZÉKENY POLIMER (KEMÉNY, RUGALMAS)
MODELL FELÉPÍTÉSI SEBESSÉGE	~12 mm/óra	~20 mm/óra	~10 mm/óra	~25 mm/óra	20 mm/óra 12 mm/óra
MUNKADARAB PONTOSSÁGA	PONTOS	PONTOS	KEVÉSBÉ PONTOS	PONTOS	LEGPONTOSABB 0,05mm TŰRÉS
MUNKADARABON ÉLES SAROK	LEHETSÉGES	KORLÁTOZVA	NEM LEHETSÉGES	KORLÁTOZVA	LEHETSÉGES
UTÓMEGMUNKÁLÁS	SZÜKSÉGES	LEHETSÉGES	NEM SZÜKSÉGES	LEHETSÉGES	NEM SZÜKSÉGES
MECHANIKAI SZILÁRDSÁG	KÖZEPES	NAGY	KÖZEPES	KICSI	KÖZEPES
MEGMUNKÁLÁS LÉZERREL TÖRTÉNIK	IGEN	IGEN	NEM	NEM	NEM
VÉDŐGÁZ HASZNÁLATA	SZÜKSÉGES	SZÜKSÉGES	NEM SZÜKSÉGES	NEM SZÜKSÉGES	NEM SZÜKSÉGES

3. A 3D nyomtatással (AM technológiák) készített termékek anyagtulajdonságai (alapanyagtól a késztermékig)

Napjainkra, a 2010 –es évek végére az additív gyártástechnológiák (köznapi használatban a 3D nyomtatás) technikai fejlődése eredményeként lehetőségeink szinte korlátlanok. A kezdeti, úgynevezett másodlagos célú felhasználástól (látványelemek, burkolati megoldások stb.) eljutottunk az elsődleges, teherviselő, élettartamuk tekintetében a hagyományos technológiával gyártottakéval megegyező, tulajdonságokkal rendelkező szerkezeti elemekig [10]. A 3.1. ábrán néhány példával emlékeztetünk a másodlagos célú felhasználásra, míg a 3.2. ábra példákat sorol az elsődleges, akár humán-gyógyászati közvetlen felhasználás lehetőségeire, teherviselő szerkezeti elemként is [10], [11].



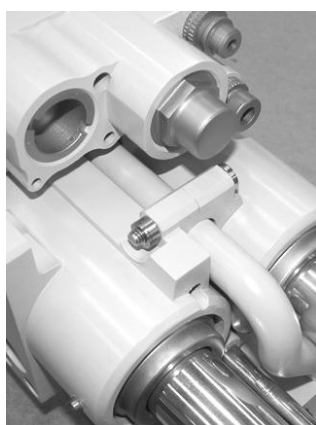
a.) barkács gép burkolati eleme



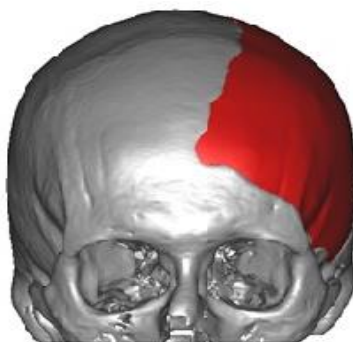
b.) épületszerkezeti modell

3.1. ábra

Példák nyomtatott, teherviselésre korlátozottan alkalmas elemekre [12]



a.) nyomtatott fém
hajtóműház



b.) nyomtatott hiányzó
koponyaelemet pótló
implantátum



c.) biokompatibilis
anyagból nyomtatott
emberi fül

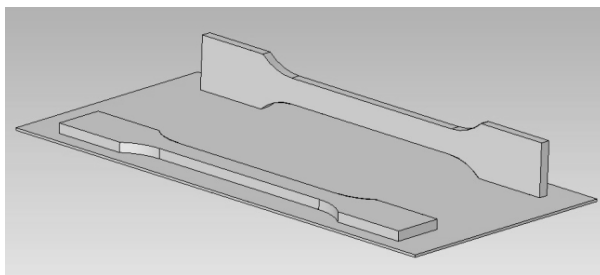
3.2. ábra

Teherviselő nyomtatott elemek [10], [11]

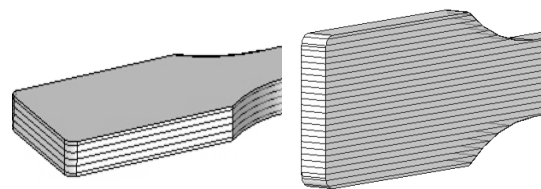
3.1. A 3D nyomtatás eljárásainak (AM technológiák) anyagmodellje

Szerkezeti elemek esetén akár másodlagos, akár elsődleges célú felhasználásról beszélünk, azok méretezésekor, tervezésekor ismernünk kell az alkatrészre ható külső terheket (terhelési modell), a számításokhoz szükséges megfogások, kényszerek jellegét, azokat a határfeltételeket, melyek közt a szerkezet üzeme során találkozunk, valamint a tervezett alkatrész anyagjellemzőit (anyagmodelljét). Ezek hiányában a keletkező igénybevételek korrekt kiszámítása nem végezhető el, így a szilárdsági, valamint az élettartam viselkedésről nem tudunk pontos képet adni. Jelen összeállításban az anyagmodell (anyagjellemzők) kérdéskörét vesszük górcső alá, különös tekintettel arra a tényre, hogy nyomtatás során egy adott alkatrész többirányú elkészítése (fektetett, állított, vagy éppen álló) is lehetséges. Nehezíti vizsgálódásunkat az a tény, hogy lokálisan kis területre koncentráló hő-bevitellel készülnek alkatrészeink, melyek során az egyes lerakott megömlött anyagrétegek igen rövid idő alatt kihűlnek, mely folyamat során az újonnan felépített anyagréteg jelentős kényszerhatásoknak van kitéve.

Bármely numerikus analízis (CAD számítás) számára szükséges a tervezendő termék anyagjellemzőinek megadása. Ezek pontos meghatározása érdekében a különböző technológiákkal elkészített próbatestek mindhárom irányú nyomtatásával, majd az így elkészített próbatestek szilárdsági vizsgálatával van lehetőség a pontos anyagjellemzők meghatározására [10]. Az irányfüggő nyomtatással készített próbatesteket a 3.3. ábra szemlélteti. A nyomtatási rétegvastagság az alkalmazott por, és technológia függvényében 16...30 mikrométer közötti értéket mutat, így célszerű mindkét határértékű nyomtatott alkatrész viselkedését megvizsgálni.



a) irányfüggően nyomtatott próbatest



b) irányfüggő nyomtatás struktúrája

3.3. ábra
Irányfüggően nyomtatott próbatest anyagjellemzőinek meghatározására [12]

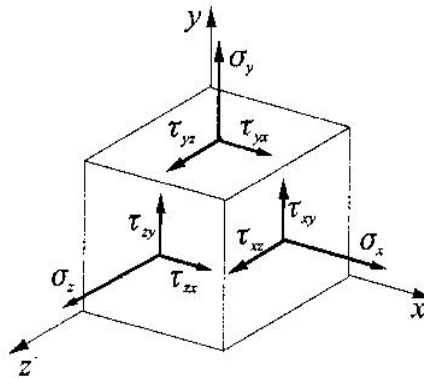
A terhelések – elmozdulások összefüggését a Hooke-törvény adja meg, amely izotróp esetben az alábbi (1) összefüggéssel írható le [10]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ valamint} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

ahol σ a kialakuló feszültségállapot, ε a nyúlás, ν a Poisson szám, E , valamint G a rugalmassági modulusok. Izotróp anyagmodell esetében egyszerű szakító vizsgálattal a kérdéses anyagjellemzők meghatározhatók.

Amennyiben a tér különböző irányokban egy próbatest eltérő anyagjellemzőkkel rendelkezik, akkor azok vizsgálata és meghatározása sokkal összetettebb eljárást igényel. Három irányban kialakuló különböző feszültségállapot jellemzésére az elemi kishasáb a 3.4. ábra alapján [12]:



3.4. ábra
Elemi kishasáb három irányú feszültségállapota [12]

Az ortotrop viselkedés leírására alkalmas általános Hooke-törvény a (2) összefüggés alapján írja le az elmozdulások és feszültségek kapcsolatát:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ahol az egyes S_{ij} paraméterek a (3) számú összefüggés alapján határozhatók meg:

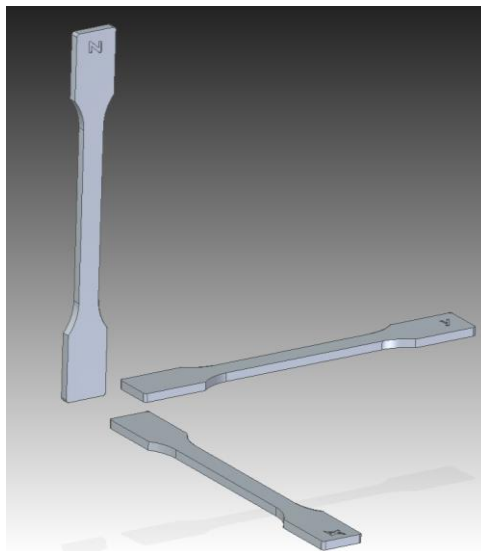
$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

amely (3) összefüggésben 9 db független konstans szerepel. Ezek meghatározása elengedhetetlen a korrekt CAD modellek megalkotásához. Természetesen lehet ezen paramétereket a gyártóktól kérni az általuk forgalmazott anyagokra, azonban a szállítók többnyire érdemi információval nem szolgálnak, már csak azért sem, mert az anyagtulajdonságok az alkalmazott technológiának is függvényei.

További kérdés az ezen az elven megvalósított szerkezeti elemek esetén a síkon belüli viselkedés nyomtatási irány függése, amely szintén csak kísérletekkel határozható meg.

A kérdéses anyagjellemzők – így az anyagmodell – meghatározására a BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Járműelemek és Szerkezetanalízis Tanszéke, valamint a BME Biomechanikai Kooperációs Kutatóközpontja a VARINEX ZRT közreműködésével mintegy évtizede folytat szisztematikus vizsgálatsorozatot a polimer nyomtatott termékek körében, az Objet-Polyjet, az FDM és az SLS technológiák által gyártott termékek pontos viselkedésének leírására [11], [13].

Az anyagjellemzők meghatározására irányuló vizsgálatokat három irányban nyomtatott, egyszerű, szabványos próbatesteken végeztük a 3.4. ábra szerint. A nyomtatási kontúrok határozzák meg a nyomtatási irányokat, amely a fekvő próbatestek esetén az x-y sík, míg a rövidebb oldalára állított próbatest esetén az x-z síkkal jellemezhető.

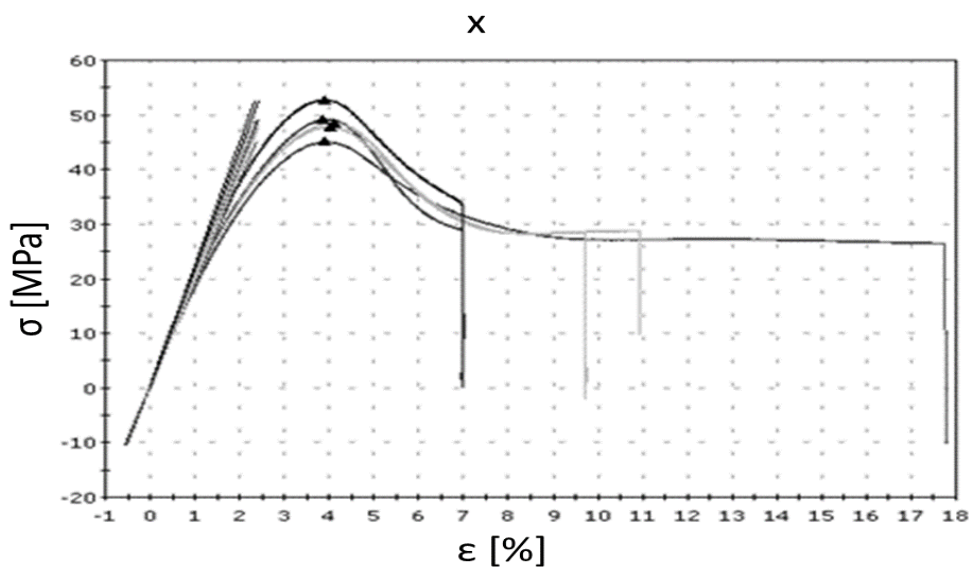


3.4. ábra

A polimer nyomtatott alkatrészek irányfüggő tulajdonságainak meghatározására szolgáló próbatestek (x-y irány fektetve, z irány hosszában élére állítva) [13]

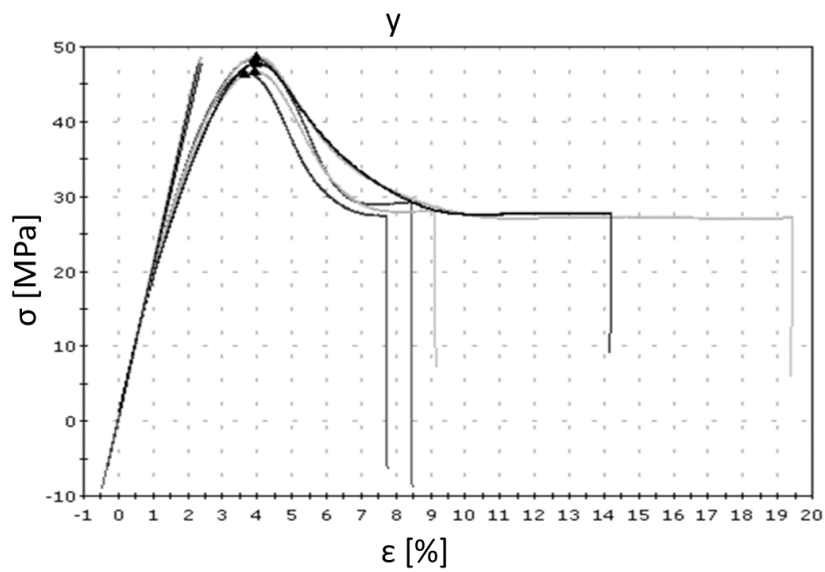
3.1.1. Objet-Polyjet technológia anyagjellemzői

A nyomtatás során *Fullcure 720* anyagot használtunk, így az anyagjellemzőket (anyagmodellt) ezen anyag tulajdonságai alapján határoztuk meg [15]. A 3.5., 3.6., valamint 3.7. ábrákon az egyes irányokban elvégzett szakítóvizsgálatok eredményét mutatja.

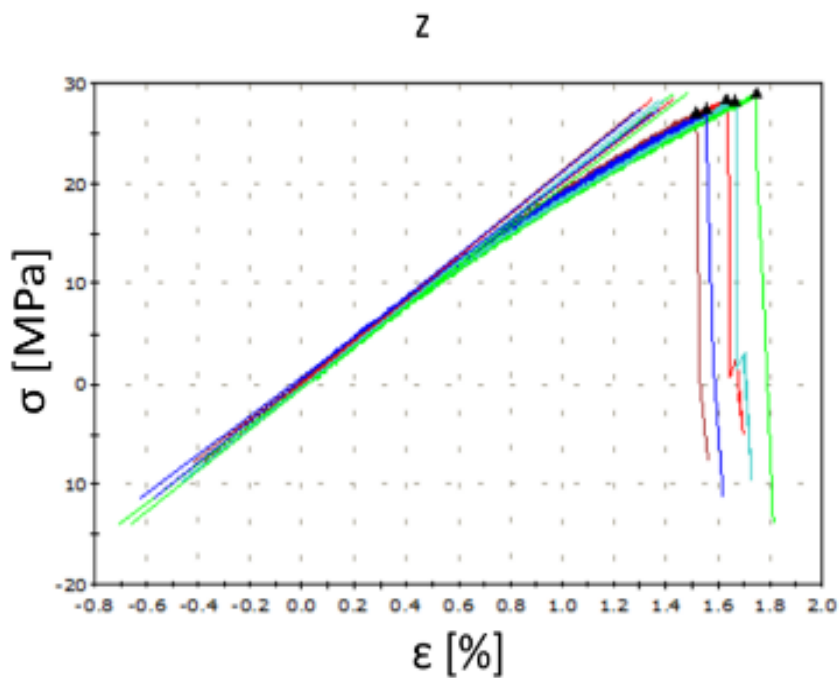


3.5. ábra

Fekvő helyzetű (3.4. ábra szerint), Objet-Polyjet technológiával nyomtatott próbatest szakítóvizsgálati eredményei [15]



3.6. ábra
Hosszabb oldalára állítva, Objet-Polyjet technológiával nyomtatott próbatest szakítóvizsgálati eredményei [15]



3.7. ábra
Rövidebb oldalára állítva (3.4. ábra szerint), Objet-Polyjet technológiával nyomtatott próbatest szakítóvizsgálati eredményei [15]

A 3.5., 3.6., 3.7. ábrák szakítóvizsgálati eredményei jól mutatják az anyag nyomtatási iránytól függő viselkedését. Az anyagmodell meghatározásához szükséges adatokat a

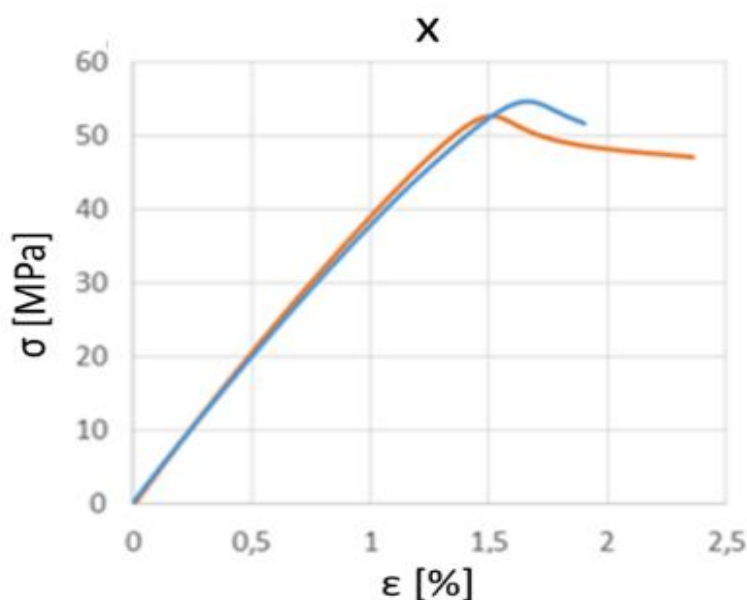
3. I. táblázatban foglaltuk össze [13]. A 3.7. ábrából megállapítható, hogy a rövidebb oldalára állított helyzetben (z irány) nyomtatott próbatest szilárdsági jellemzői mintegy a felét teszik ki a fekvő, illetve állított pozícióban nyomtatottakéhoz viszonyítva. Mindezen tények egyértelműen mutatják az anyag ortotróp viselkedését, azaz a szilárdsági számítások során a nyomtatási irányfüggőséggel mindenképpen számolni szükséges.

3. I. táblázat
Objet-Polyjet technológia anyagjellemzői.

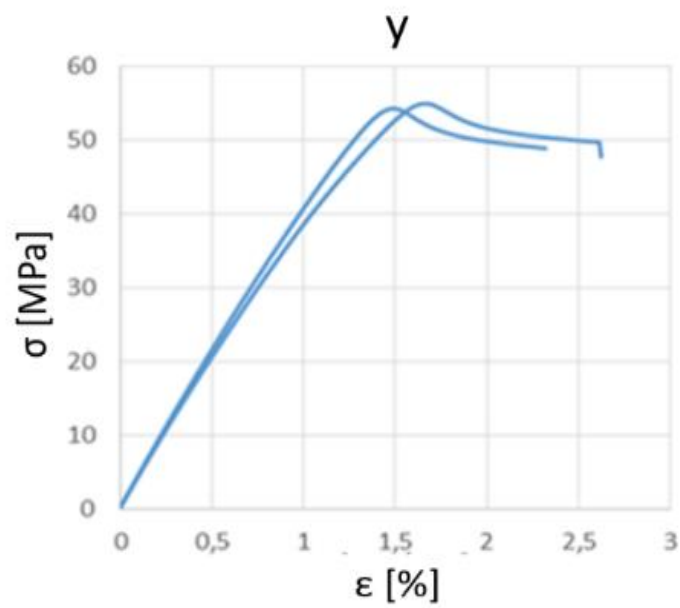
	Szakítószilárdság R_m [MPa]	Young modulus E [MPa]
Fekvő, álló (x-y)	$48 \pm 0,8$	2068 ± 19
Állított (z)	$28,15 \pm 0,79$	1980 ± 39

3.1.2. FDM technológia anyagjellemzői

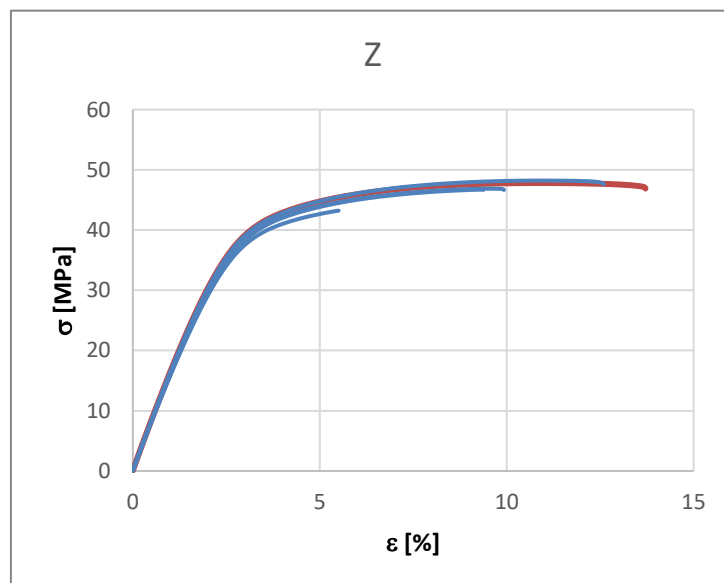
A nyomtatás során *PA jelzésű* anyagot (Poliamid) használtunk, így az anyagjellemzőket (anyagmodellt) ezen anyag tulajdonságai alapján határoztuk meg [13]. A 3.8., 3.9., valamint a 3.10. ábrák az egyes nyomtatási irányokban elkészített próbatestek szakítóvizsgálatainak eredményeit mutatják.



3.8. ábra
Fekvő helyzetű (3.4 ábra szerint), FDM technológiával nyomtatott próbatest szakítóvizsgálatainak eredményei [13]



3.9. ábra
Hosszabb oldalára állítva, FDM technológiával nyomtatott próbatest
szakítóvizsgálati eredményei [13]



3.10. ábra
Rövidebb oldalára állítva (3.4 ábra szerint), FDM technológiával nyomtatott próbatest
szakítóvizsgálati eredményei [13]

Az FDM technológia szakítóvizsgálati eredményeit összefoglalóan a 3. II. táblázat mutatja be.

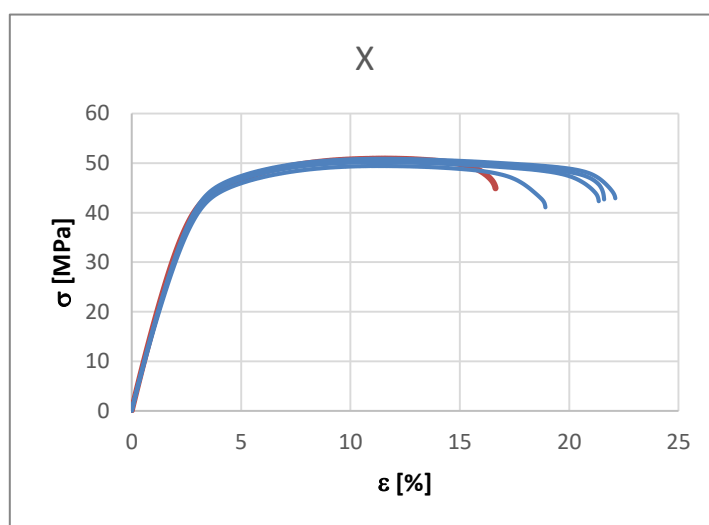
3. II. táblázat
FDM technológia anyagjellemzői

	Szakítószilárdság R_m [MPa]	Young modulus E [MPa]
Fekvő, álló (x-y)	$54,619 \pm 0,33$	$3019,817 \pm 67,909$
Állított (z)	$27,464 \pm 2,928$	$2891,227 \pm 6,695$

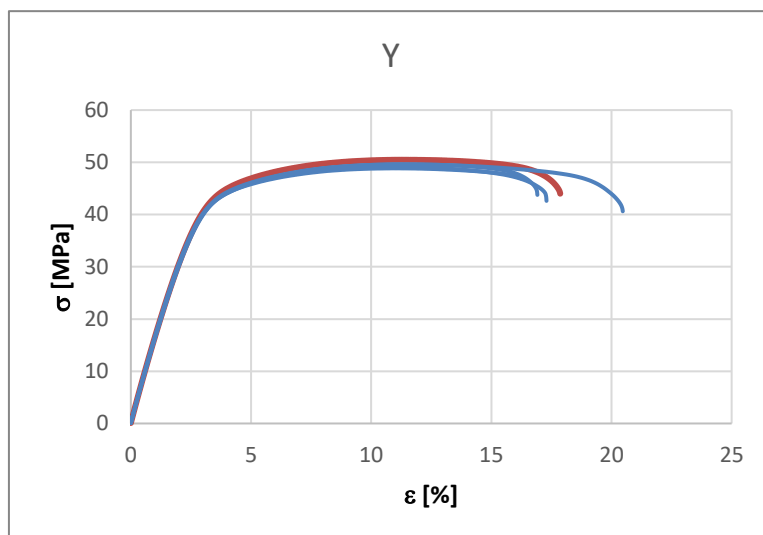
Az FDM technológiával nyomtatott termékek irányfüggő viselkedést mutatnak, amely ortotróp anyagtörvénnyel írható le.

3.1.3. Az SLS technológia anyagjellemzői

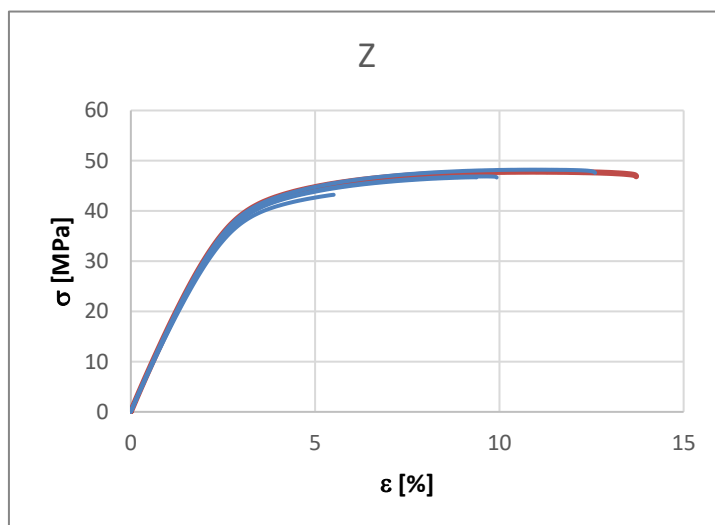
A vizsgálatokat PA (Poliamid) márkanevű anyagon végeztük el. A szakítóvizsgálatok eredményeit a 3.11., 3.12., valamint a 3.13. ábrákon mutatjuk be [13].



3.11. ábra
Fekvő helyzetű (3.4. ábra szerint), SLS technológiával nyomtatott próbatest
szakítóvizsgálati eredményei [13]



3.12. ábra
Hosszabb oldalára állítva, SLS technológiával nyomtatott próbatest szakítóvizsgálati eredményei [13]



3.13. ábra
Rövidebb oldalára állítva (3.4. ábra szerint), SLS technológiával nyomtatott próbatest szakítóvizsgálati eredményei [13]

A három irányban elvégzett vizsgálatok eredményeit táblázatos formában a 3. III. táblázat tartalmazza.

3. III. táblázat
SLS technológia anyagjellemzői

	Szakítószilárdság R_m [MPa]	Young modulus E [MPa]
Fekvő, álló (x-y)	49,93615 \pm 0,9	1713,48 \pm 40
Állított (z)	47,4045 \pm 0,8	1661,039 \pm 30

Megállapíthatjuk, hogy az SLS technológiával nyomtatott termékek számottevő irányfüggő tulajdonságot nem mutatnak, így viselkedésük az izotróp anyagmodell alkalmazásával leírható.

3.2. Maradó feszültségek kérdése az additív gyártástechnológiák polimer termékei esetén

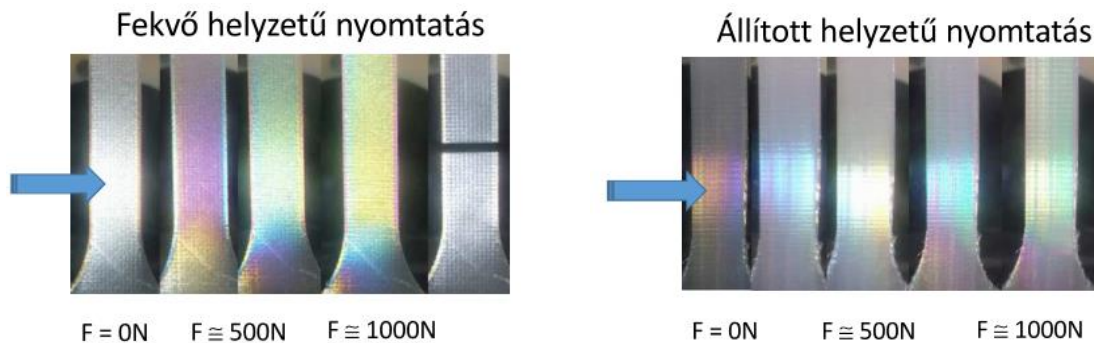
Maradó feszültségek keletkezéséről, azon belül is I. rendű (makroszkópikus) feszültségek kialakulásának lehetőségéről Masing [14] osztályozása szerint az alábbi feltételek teljesülése esetén beszélhetünk:

- a jelenség nagy felszínekre terjed ki,
- keletkezési okát tekintve egyenlőtlen a hűlés pl. viszkoelasztikus állapotból,
- maradó deformáció jön létre pl. az gyártási eljárás következtében,
- helyi térfogatváltozást tapasztalunk, valamely gyártási folyamatra visszavezethetően.

Miután a különféle additív gyártástechnológiák – akár polimer, akár fémes termékek előállításáról beszélünk – lokális hő bevezetéssel olvasztják meg anyagaikat, melyek igen rövid idő alatt kell, hogy jelentős hőmérsékletváltozást szenvedjenek, valamint térfogatváltozásukban a felrakás során bizonyos mértékig korlátozottak, felmerül az a kérdés, miszerint nem terheltek-e a nyomtatott darabok olyan mértékben maradó feszültséggel, amelynek mértéke veszélyezteti azok megbízható és tervezhető üzemeltetését.

Mindezen kérdések megválaszolásához mérnünk kellene a nyomtatott próbatestek nyomtatást követő feszültségállapotát. Erre alkalmat teremt az optikai feszültségvizsgálat eljárása, amelynek alkalmazásához átlátszó, optikailag aktív próbatestek nyomtatására van szükség. Az így kinyomtatott próbatestek polarizációs szűrők között lefolytatott szakítóvizsgálata választ adhat a felmerült kérdésekre [15]. Vizsgálatainkat FDM technológiával nyomtatott áttetsző szakító próbatesteken

végeztük, fekvő, valamint állított helyzetű (3.4. ábra jelöléseivel X valamint N irányok) nyomtatási irányokkal. A próbatestek szakítóvizsgálata során nyert optikai feszültségvizsgálati rendszám ábrákat a 3.14. ábra szemlélteti. Az észlelt rendszámok alapján a kapott képek feszültségre történő kiértékelése az optikai feszültségvizsgálat alapegyenletének alkalmazásával elvégezhető [15].

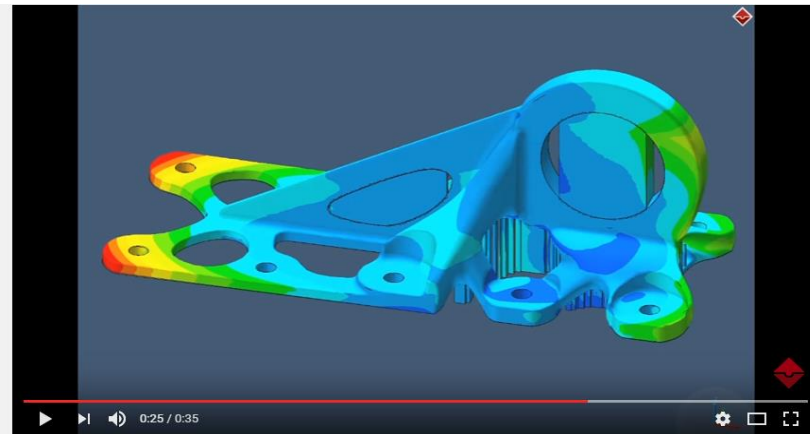


3.14 ábra
FDM próbatestek szakítás közbeni optikai feszültségvizsgálata maradó feszültségek meghatározásához [15]

A lefolytatott gyártás során keletkező maradó feszültség meghatározására irányult vizsgálataink alapján az alábbi megállapításokat tehetjük:

- a feszültségoptikai képek elemzéséből látható, hogy a nyomtatott próbatestek maradó feszültséggel terheltek;
- a terheletlen nyomtatott FDM modell nem feszültségmentes,
- nyomtatás utáni húzófeszültség esetén csökken a próbatest terhelési kapacitása (terhelhetősége),
- nyomtatás után kialakult nyomófeszültség esetén növekszik a próbatest terhelhetősége
- A nyomtatási paraméterek (hőmérséklet, rétegvastagság, huzal sebesség) változtatásával a maradó feszültségek mértéke csökkenthető.

A nyomtatási folyamat gyártási paramétereinek változtatásával lehetőség nyílik a maradó feszültséget eredményező beállítások módosításra. Erre mód nyílik a numerikus szimuláció alkalmazásával is, melyre egy példát 3.15. ábrán mutatunk [22].



3.15 ábra

Simufact szoftver az additív gyártási eljárással készített alkatrész (repülőgép bekötő bak) nyomtatás utáni alaktorzulásának vizsgálatára [22]

A 3.15. ábrán a kinyomtatott késztermék látható, külső terhektől mentes állapotban. Érdeemes megfigyelni, hogy a kérdéses bak elülső felén található lefogó csavarok környezetében jelentős a nyomtatásból (hő bevezetés majd visszahűlés) keletkezett visszamaradó feszültség, amely ebben a környezetben található magas rendszám értékből vezethető le, és számszerűsíthető.

Lehetőségünk van a tisztán számítással kapott eredmények (a 3.15. ábra numerikus szimuláció eredményét mutatja) kísérleti ellenőrzésére is (validáció), amelynek lefolytatására a [16] irodalomban találunk példát.

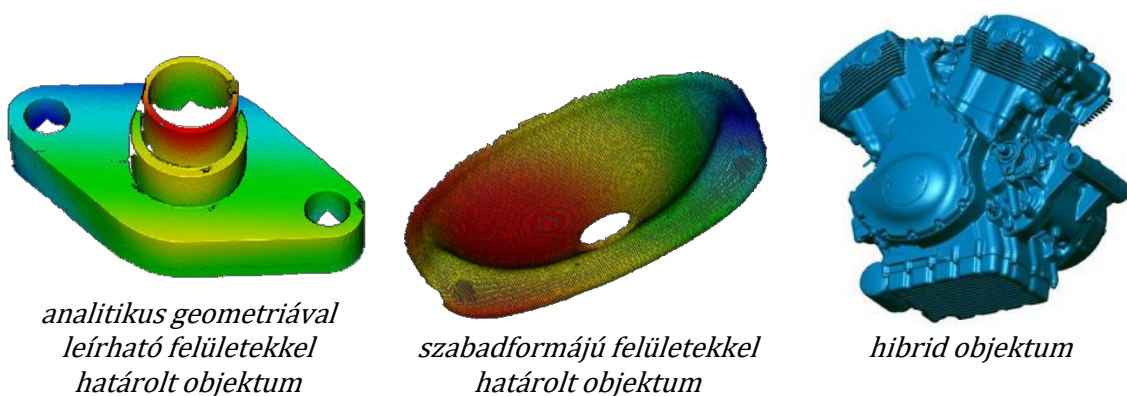
4. Objektum-felületek előállítása a 3D nyomtatás számára 3D szkenneléssel

A mérnöki gyakorlatban számos esetben találkozunk olyan feladattal, amikor létező tárgy, objektum pontos geometriai adatai ismeretlenek, amely tény megnehezíti, vagy éppen lehetetlenné teszi annak ismételt előállítását. Azt a mérnöki folyamatot, amely során egy fizikailag már létező tárgy (alkatrész, szobor, stb.) számítógépes CAD-geometriáját alkotjuk meg, és ezt követően változatlan formában, vagy a szükséges változtatások átvezetésével reprodukáljuk, mérnöki rekonstrukciónak, vagy idegen kifejezéssel „reverse engineering”-nek nevezzük. A folyamat során valamilyen eljárással megmérjük az ismeretlen objektum geometriáját, lehetőség szerint olyan eszközzel, amely a mérési adatokat a további gyártás (vagy áttervezés) számára megfelelő, digitális formában biztosítja.

4.1. Objektumok felületek szerinti osztályozása

A minket körülvevő világban létező objektumokat az azokat alkotó felületeik alapján az alábbiak szerint osztályozhatjuk: természeti, művészeti, valamint mérnöki objektumok. A mérnöki objektumok három további csoportba sorolhatók: analitikus geometriával leírható felületekkel határolt objektum, szabadformájú felületekkel határolt, és hibrid objektumok [17]. A mérnöki objektumok típusaira a 4.1. ábrán láthatunk egy-egy példát.

Az objektumok geometriai adatait számítógépes rendszerek számára a felületdigitalizálás folyamatában tudjuk biztosítani.

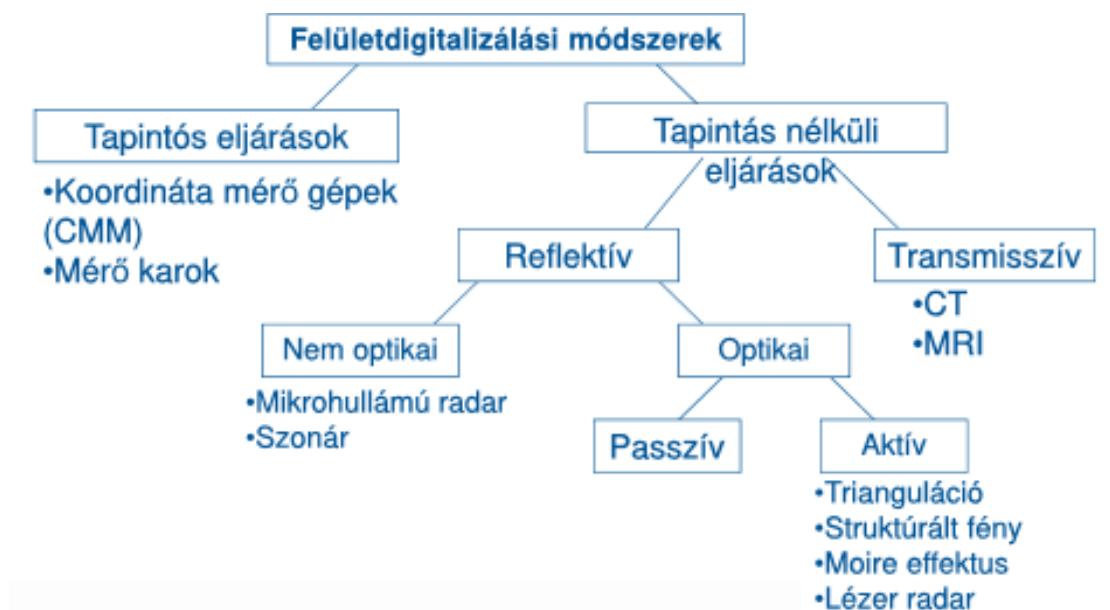


4.1 ábra
Mérnöki objektumok felület szerinti osztályozása [17]

4.2. Felületdigitalizáló eljárások

A felület digitalizáláshoz napjainkban olyan eszközöket, berendezéseket használnak, melyek során az alkalmazott mérőeszköz a kérdéses felületet valamilyen fizikai elv alapján felméri (lepasztázza), majd a geometriai adatokat a megfelelő digitális formában további felhasználásra – pl. a termék additív gyártási technológiával történő ismételt előállítására - rendelkezésre bocsátja. A felületdigitalizálás eljárásait a 4.2. ábra szemlélteti [17]. A mérnöki rekonstrukció folyamatában a felületgeometria digitalizálása csak egy lépés, ezt követően számos egyéb, a tényleges alkatrész legyártásához munkafázist is el kell végezni (processzási eljárások, szegmentálás, felületillesztés), amíg eljutunk a beolvasott alkatrész gyártásáig [17].

A digitális szkennelés (beolvasás) eljárásai a 2010-es években robbanásszerű fejlődésen estek át. Napjainkra olyan optikai kézi szkennerek állnak a mérnökök rendelkezésére, amelyek pontossága eléri az ezred mm nagyságrendet, így a rekonstruált termék mindenben azonos funkciókkal rendelkezhet, mint az eredeti [17]. A digitalizálás eszközei közül egy kézi szkennert láthatunk a 4.3. ábrán.



4.2. ábra
Felületdigitalizálás eljárásai [17]



*4.3. ábra
Handyscan 3D lézerszkennér [17]*

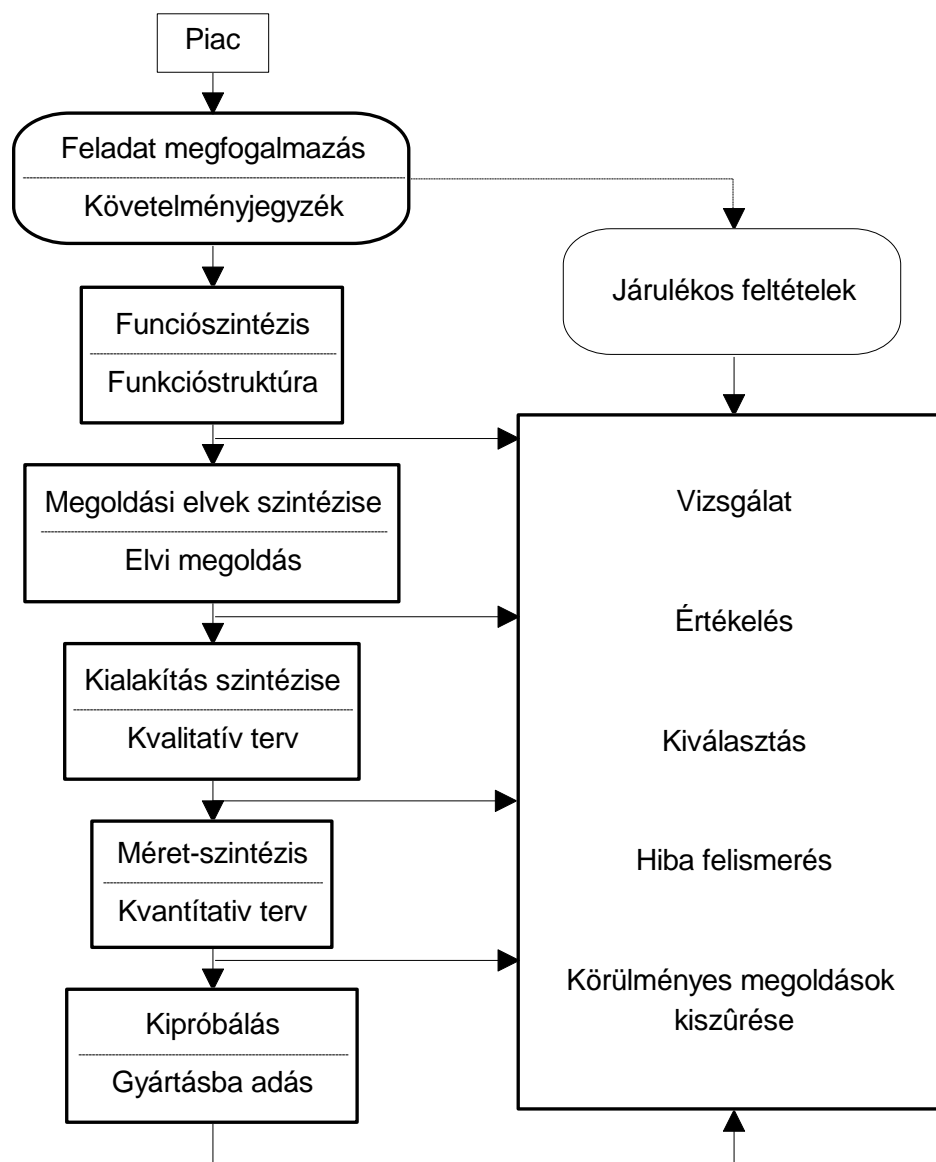
A 4.3. ábrán látható eszköz néhány jellemzője: TRUaccuracy funkció, amely a valós, mindennapi mérési környezetben is biztosítja a pontos méréseket, az alkatrészek mérete, összetettsége és anyaga sem jelent korlátot. A rendszer beállítása kevesebb, mint 2 percet vesz igénybe, az adatok beolvasása után kapott fájlok egyből használhatók a munkafolyamatban. Nincs szükség utólagos feldolgozásra, térfogati pontossága $60\text{ }\mu\text{m/m}$.

A mérnöki rekonstrukció gépészeti alkalmazása igen szerteágazó. Alkalmazható a szabadformájú felületekkel határolt gépészeti objektumok (pl. autókarosszéria elemek) rekonstrukciójára, régi, papíralapú terveken létező tárgyak adatainak számítógépes feldolgozására, elhasználódott szerszámok újragyártására, formák, öntőminták gyártására, felépítéses gyártástechnológiák számára gyártásra alkalmas adatok szolgáltatására (DDM), termékellenőrzésre, konkurens termékek vizsgálatára stb. [17].

5. Felépítéssel technológiák gyártási eljárásainak hatása a terméktervezés folyamatára

A terméktervezés folyamata egy piaci igény felmerülésével kezdődik, mikor is világossá válik, van fizetőképes kereslet (felvevőpiac) egy adott termékre, amely jelenleg nem áll rendelkezésre. Az első fázisban annak tisztázása a feladat, mi a termék célja, milyen tulajdonságokkal kell rendelkezzen (mit várunk el a terméktől), és mi a megvalósítani kívánt termék pontos specifikációja. Ez utóbbi feltételnek megfelelni csak abban az esetben lehetséges, amennyiben megalapozott, konkrét feladatra vonatkozó piackutatási eredményekre tudunk támaszkodni. Ebben a fázisban tehát minden feltételt és korlátozást figyelembe kell vennünk (mindegyik esetében szükséges a megfelelő súlyozással történő megjelenítés), ami ott és akkor tudásunk alapján rendelkezésre áll [18].

Az ezt követő konstrukciós folyamat egy igen összetett, magas innovációs készséget igénylő eljárásrend, amelyben a funkcióanalízis alapján felállított funkcióstruktúra az egyik legfontosabb tervezési momentum. Az első lépés az elemi funkciók (elemi műveletek) meghatározása, majd ezekből a kérdéses funkcióstruktúra (milyen feladatok megvalósítását képes a tervezett termék ellátni) felállítása. A funkcióstruktúrára tudunk ugyanis megoldáselveket keresni, (természetesen többet egy adott feladatra), melyekből ki tudjuk választani a reális megoldások körét. A tervezési, konstrukciós folyamat egy lehetséges sémáját az 5.1. ábrán mutatjuk be [18].

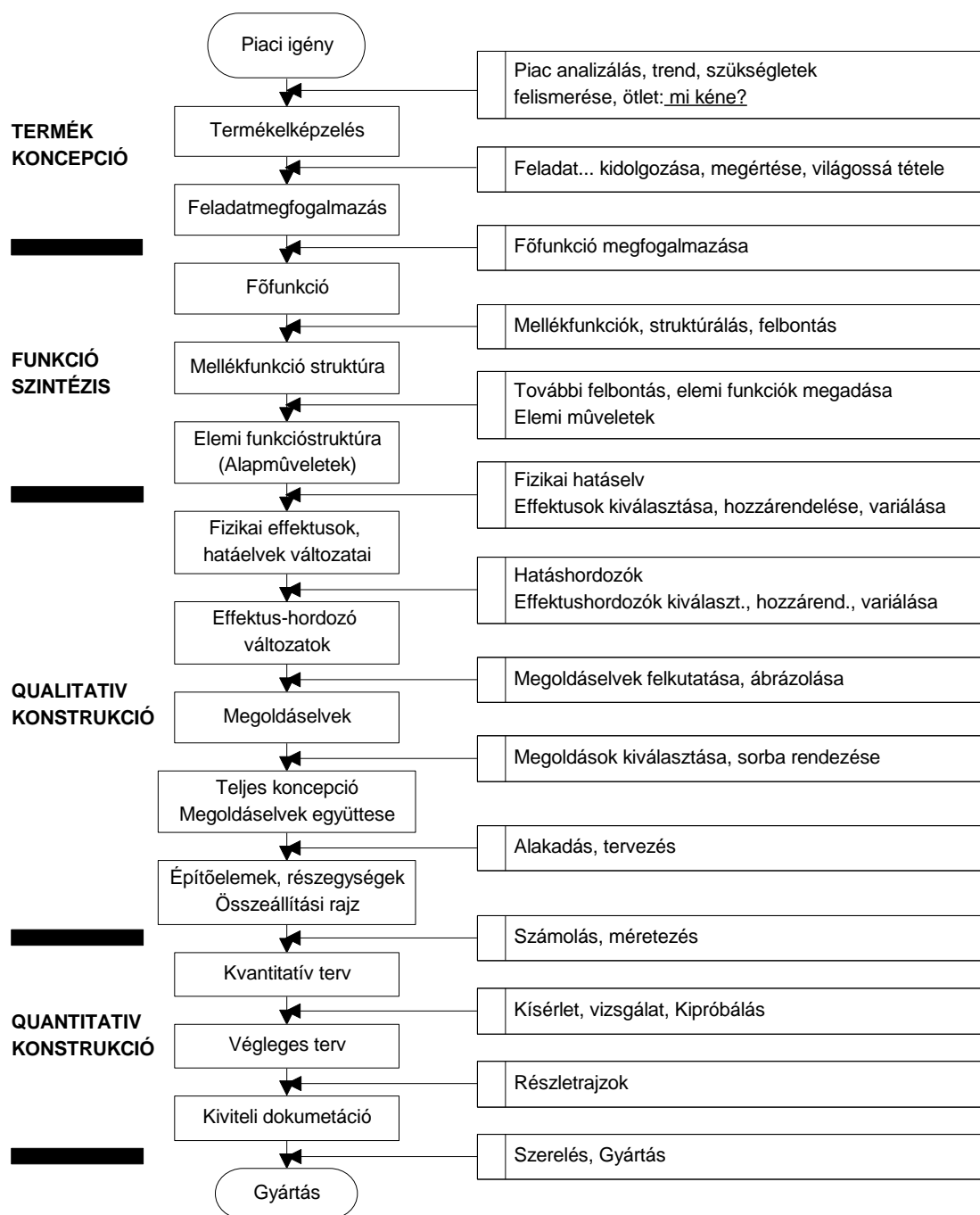


5.1. ábra
A tervezés, konstrukciós folyamat egy lehetséges sémája [18]

A megoldáselvek tisztázása, a reális megoldás elfogadása után kezdődik a tervezés, annak először minőségi, majd számszerűsített, mennyiségi változata. Ebben a fázisban gyakorlatilag az önálló alkatrészek tervezése folyik, az azokra ható külső terhelések, valamint az adott termék anyagára vonatkozó anyagmodellek ismeretében. A megtervezett alkatrészek összeszerelését követően – az ütközések, alámetszések vizsgálatára a CAD programok lehetőséget biztosítanak – beszélhetünk részegységről, amely akár önállóan működni képes termékként is működtethető.

A kvalitatív konstrukció fázisában határozzuk meg az egyes alkatrészekre illesztett elemi műveleteket (pl. erő átalakítása elmozdulássá: ez az elem a rugó, amely hatást különböző hatáshordozóval tudunk megvalósítani), és az elemi műveletek összessége

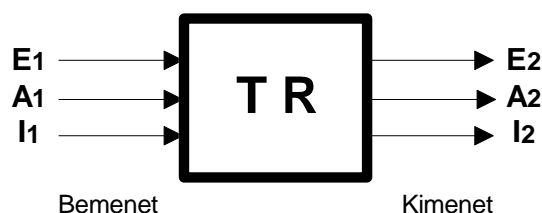
biztosítja a kívánt tervezési funkció megvalósítását [18]. Ezt követően a tervezés mennyiségi (kvantitatív) szakaszában elkészítjük a korábban említett szilárdsági, dinamikai számításokat, az igények és lehetőségek figyelembevételével. A tervezési, konstrukciós eljárás egy lehetséges folyamatábráját az 5.2. ábrán láthatjuk [18].



5.2. ábra
A konstrukciós folyamat egy lehetséges sémája [18]

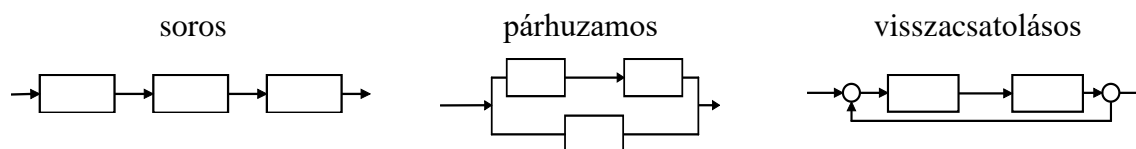
5.1. A funkcióstruktúrák felállítása

A funkcióstruktúra felállításakor a technikai rendszer (TR) ki- és bementi oldalán található jellemzőkből kell kiindulnunk. A TR általános értelmezését az 5.3. ábra szemlélteti [18]. A TR bemeneti oldalán található anyag (A), energia (E), információ (I) a TR által jellemzett fekete dobozban új értékeket vesz fel, amely a kimeneti oldalon jelenik meg (ugyanazon mennyiségek 2-es index-el jelölve az 5.3. ábrán).



5.3. ábra
A TR általános jellemzése [18]

A TR-ben megfogalmazott funkciók un. elemi, vagy részfunkciókra bonthatók, melyek soros vagy párhuzamos kapcsolásban képesek a szóban forgó funkció megvalósítására [18]. A főfunkció által meghatározott az ok-okozati kapcsolat, amelyet a részfunkciók alkalmasan megválasztott kapcsolása valósít meg (5.4. ábra).



5.4. ábra
Részfunkciók kapcsolási lehetősége a főfunkció megvalósítása érdekében [18]

Ezen a ponton válik világossá, hogy az eddig alkalmazott tervezési elméletek és eljárások – az egy lépésben gyártható, főfunkcióját tekintve önállóan is működőképes részegységek egy lépésben történő gyártási lehetőségével – finomításra szorulnak. Ennek az lehet a lényege, hogy nem elemi részfunkciókra kell a tervezési folyamatot koncentrálni és lebontani, hanem a működőképes részegységek szintjén kell azt megoldani. Természetesen mind a terhelési modellek, mind az anyagmodellek területén – miután több alkatrészből álló egységet gyártunk egy munkamenetben – ez a tény sokkal komplexebb, részletekbe menő megközelítést igényel, melynek elméleti és gyakorlati kimunkálása a közeljövő feladata.

6. Felhasznált irodalom

- [1] Gépipari Gyártástechnológiák II. - Forgácsnélküli mechanikai technológiák. Mészáros György, Varnyú Ferenc (2011) SZTE JGYPK (TÁMOP-4.1.2 A1 és a TÁMOP-4.1.2 A2 könyvei)
- [2] Gyártástechnológia II. BAGGT23NND/NLD. Dr. Mikó Balázs, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet, 2015.09.30.
- [3] Roadmap for Additive Manufacturing Identifying the Future of Freeform Processing. Edited by David L. Bourell, The University of Texas at Austin and Ming C. Leu, Missouri University of Science and Technology, and David W. Rosen Georgia Institute of Technology.

Published by The University of Texas at Austin Laboratory for Freeform Fabrication Advanced Manufacturing Center 1 University Station, MC C2200 Austin TX 78712-0292, United States of America. sffsymp@uts.cc.utexas.edu. 2009
- [4] GYÁRTÁSAUTOMATIZÁLÁS. Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés. Szerkesztette: TAKÁCS JÁNOS. Írta: BALLA SÁNDOR, BÁNLAKI PÁL, GÖNDÖCS BALÁZS, HAIDEGGER GÉZA, MARKOVITS TAMÁS, PÁL ZOLTÁN, TAKÁCS JÁNOS, WELTSCH ZOLTÁN. Lektorálta: SZMEJKÁL ATTILA. Egyetemi tananyag, 2012. Digitális tankönyvtár. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/0018_Gyartasautomatizalas/adatok.html
- [5] Ficzer Péter: Gyors prototípus numerikus és kísérleti szilárdsági analízise. Ph.D. disszertáció. BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar (2012.04.03. prezentáció).
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))
- [7] <https://www.youtube.com/watch?v=NM55ct5KwiI>
- [8] VARINEX: <http://3dnyomtatás.varinex.hu/mit-is-jelent-a-3d-nyomtatás-hogyan-mukodik/>
- [9] BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM, GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR POLIMERTECHNIKA TANSZÉK. B4-RPT/RT. Polimer termékek kisszériás gyártása. 2014.február 13. V.3.3.

- [10] Borbás Lajos: Additív gyártástechnológiák: Lehetőségek és kérdőjelek. Előadás a Magyar Mérnöki Kamara, Gépészeti Tagozata szervezésében, 2016. november 29., 1094 Budapest, Angyal u. 1-3.
- [11] Ficzer Péter, Borbás Lajos Gyors prototípus anyagok orvosi alkalmazásának lehetőségei, kérdései (pp.: 17) CD kiadvány: Korszerű anyagok és gyártástechnológiák a gyógyászatban konferencia. EDUTUS Főiskola, Tatabánya, 2014. 05 30-31. ISBN 978-963-88981-2-8
- [12] BORBÁS LAJOS PH.D - FICZERE PÉTER PH.D.: ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK: LEHETŐSÉGEK ÉS KÉRDŐJELEK. ACTA PERIODICA 11. KÖTET EDUTUS FŐISKOLA KIADÁSA 2016. www.edutus.hu, ISSN 2063-501X
- [13] Péter Ficzer, Lajos Borbás, György Falk, Gábor Szabó: EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MATERIAL MODEL OF MACHINE PARTS PRODUCED BY SLS TECHNOLOGY. 34th Danubia Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics. Italy, Trieste, 22...25 September, 2017. Proceedings. pp.: 53-54. <https://www.openstarts.units.it/handle/10077/14834>
- [14] Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International 2008, USA. pp: 347-358.
- [15] Borbás Lajos, Ficzer Péter: Kérdőjelek az additív gyártástechnológiákban (maradó feszültségek polimerek nyomtatásakor). GÉP 2017/2 szám, LCVIII évfolyam, pp.: 5-10. ISSN 0016-8572
- [16] Peter Ficzer, Lajos Borbas, Adam Torok: Validation of Numerically Simulated Rapid-prototype Model by Photoelastic Coating. Acta Mechanica Slovaca 18 (1): 14 - 24, 2014, DOI: 10.1515/mopa-2014-0002, c 2014 VersitaOpen Ltd. All rights reserved.
- [17] Borbás Lajos: „Reverse Engineering” mérnöki rekonstrukció. Bozay Melinda (Ph.D. Hallgató, BME) összeállítása alapján. Előadás a KAMARA Gépészeti Tagozata továbbképzési rendszerében, 2017. május, 1094 Budapest, Angyal u. 1-3.
- [18] Jármű- és hajtáselemek II. a BSc. mérnökképzés számára. BME Közlekedésmérnöki Kar Járműelemek és Hajtások Tanszék. Szerkesztette Devecz János, 2011. www.tankonyvtar.hu

7. Ajánlott szakirodalom

- [19] J.J. Beaman, J.W. Barlow, D.L. Bourell, R.H. Crawford, H.L. Marcus, K.P. McAlea, "Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing", Kluwer Academic, Publishing, Boston, 1997.
- [20] T. Wohlers, "Wohlers Report 2008", Wohlers Associates, Ft. Collins, 2008
(3). F.B. Prinz, C.L. Atwood, R.F. Aubin, J.J. Beaman, R.L. Brown, P.S. Fussell, A.J. Lightman, E. Sachs, L.E. Weiss, M.J. Wozny, "JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan", World Technology Evaluation Center, Baltimore, 1997.
- [21] NCMS Report 0199RE98, "The Road to Manufacturing: 1998 Industrial Roadmap for the Rapid Prototyping Industry", National Center for Manufacturing Sciences, June 30, 1998, Ann Arbor.
- [22] 3D gyártási eljárás folyamatának szimulációs lehetősége:
<https://www.youtube.com/watch?v=AMJseXVktWw>
- [22] <http://3dakademia.freedee.hu/3d-oktatasok/az-additiv-gyartastechnologiak-helye-a-kulonbozo-gyartasi-eljarasok-kozott-es-a-gyartofolyamatok-optimalizalasa-3d-nyomtatassal/>
- [23] <http://www.freedee.hu/3d-szkennererek/sense/>

8. Információs anyagok, adatbázisok, elérhetőségeik

- [24] <https://www.eos.info/en>
- [25] <http://varinex.hu/>
- [26] <http://3dakademia.freedee.hu/>
- [27] www.eos.info

Mellékletek

Rövidítésjegyzék

Rövidítés	Jelentése
ABS	Akrilnitril-Butadilén-Sztirol (polimer, műanyag alapanyag)
AM	Additiv manufacturing (anyag-hozzáadásos gyártás)
CAD	Computer Aided Design (számítógéppel segített tervezés)
CAM	Computer Aided Manufacturing (számítógéppel segített gyártás)
DDM	Direct Digital Manufacturing (közvetlen digitális gyártás)
FDM	Fused Deposition Modeling (megömlesztve összeépítő gyártás)
LOM	Laminated Object Manufacturing (réteges lemezes gyártás)
PA	Poliamid
PLA	Polylactic Acid (politejsav)
SLA	Stereolithography (sztereolitográfia)
SLS	Selective Laser Sintering (szelektív lézer szinterezés)
RP	Rapid Prototyping (gyorsprototípus gyártás)
TR	Technikai rendszer
3D	3D printing (3D térbeli nyomtatás)
3DP	3D Printing (3D térbeli nyomtatás)

A sorozat keretében eddig megjelent kiadványok

1. NÉMETH András, MILÁVE CZ Richárd Iparban használatos vízminőségek
2. DR. SZILÁGYI Zsombor, DR. SZUNYOG István Mérések a gáziparban
3. DR. BARNA Lajos, EÖRDÖGHNÉ DR. MIKLÓS Mária, DR. SZÁNTHÓ Zoltán, DR. BALLA József, A biztonságos ívóvízellátás megteremtésének tervezési eszközei
4. BORBÁS Lajos Dr. Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben
5. BERENCSI Miklós, BERE CZKY Ákos, HORVÁTH László, KOVÁCS Gergely, MIHÁLFFY Krisztina Kerékpárosbarát közlekedéstervezés
6. TŰDŐS Tibor, DR. VARJÚ György, DR. PETRI Kornél, GÁBOR András A csillagpontkezelés legújabb külföldi és hazai eredményei (Útmutató és tervezési segédlet)
7. DR. GARBAI László, DR. JASPER Andor, VÁRADI András Fűtési és használati melegvíz-igények kockázati elvű méretezése példákkal
8. KÁDI Ottó, DOHÁNY Máté, JÓZSA Bálint, LÁSZLÓ Csaba Tibor, JAKKEL Ottó A közúti vasutak (villamos) tervezésével kapcsolatos kézikönyv