



Neumann János Egyetem
Műszaki és Informatikai
Kar

FDM nyomtatott próbatestek kifáradásának vizsgálata, és az ehhez használt fárasztógép rekonstrukciós tervezése

Fatigue testing of FDM printed
specimens and reconstruction design
of the fatigue machine used for this

Wagner Márton
BQR6H8

Dr. Kun Krisztián, tanszékvezető-helyettes

2023

Tartalom

BEVEZETÉS	6
1. SZAKIRODALOMKUTATÁS A POLIMEREK FÁRASZTÓVIZSGÁLATÁNAK VONATKOZÁSÁBAN	7
1.1. A POLIMEREK VIZSGÁLATA.....	7
1.2. AZ FDM NYOMTATÁS HATÁSA A KIFÁRADÁSRA.....	9
1.3. A TANSZÉKEN TALÁLHATÓ POLIMERFÁRASZTÓ BERENDEZÉS	11
1.4. HAJLÍTÁSNÁL FELLÉPŐ MECHANIKAI FESZÜLTSEGEK.....	12
2. A TANSZÉKEN TALÁLHATÓ BERENDEZÉS REKONSTRUKCIÓS FOLYAMATA	13
2.1. A BERENDEZÉS SZÉTSZERELÉSE	13
2.2. ALKATRÉSZEK MÉRÉSE.....	15
2.3. A 3D MODELL ELKÉSZÍTÉSE A GÉP MECHANIKAI RÉSEIRŐL.....	16
2.4. A BERENDEZÉS ÖSSZESZERELÉSE	21
3. POLIMER PRÓBATESTEK KÉSZÍTÉSE KÍSÉRLET-TERV SZERINTI ADDITÍV ELJÁRÁSSAL.....	21
3.1. AZ FDM TÍPUSÚ ADDITÍV ELJÁRÁS LEÍRÁSA.....	21
3.2. A PRÓBATESTEK KIALAKÍTÁSA.....	23
3.3. A PRÓBATESTEK ELKÉSZÍTÉSE	24
3.4. AZ ELKÉSZÜLT PRÓBATESTEK ELLENŐRZÉSE.....	27
4. A GYÁRTOTT PRÓBATESTEK FÁRASZTÁSA A BERENDEZÉS SEGÍTSÉGÉVEL	28
4.1. A PRÓBATESTEK FÁRASZTÁSA	28
4.2. A MINTADARABOK SZAKÍTÓ VIZSGÁLATA	30
4.3. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	32
5. TECHNOLÓGIAI AJÁNLÁS AZ ADDITÍV ELJÁRÁSHOZ, A KIFÁRADÁSI HATÁROK ISMERETÉBEN	47
6. ÖSSZEGZÉS.....	49
7. SUMMARY	50
8. FÜGGELÉK.....	51
ÁBRAJEGYZÉK	54
TÁBLÁZAT JEGYZÉK:	55

Bevezetés

A 2020-as évek összes műanyagfelhasználásnak 8 százaléka az autóiparhoz kapcsolódik miközben, a polimerek térhódítása igen jelentősé vált egyéb különböző szerkezetek gyártásánál is. Eközben a műanyagok anyagi jellemzőiről kevesebbet tudunk, mint a fémek tulajdonságairól.

Ezen szakdolgozat célja, hogy bővítse a polimerekről szerzett ismereteket azok kifáradásának tekintetében, FDM technológiájú nyomtatványok vizsgálatával, kihajlásból adódó fáradás szempontjából. A kifáradás egy anyag fáradási törvényszerűsége, amelynek során az anyag folyamatos terhelés hatására megsérül és végül meghibásodik. Az ilyen, természetes jelenség analizálása és az FDM technológiával nyomtatott tárgyak vizsgálata lehetővé teszi a szakemberek és mérnökök számára, hogy optimalizálják a futótűzként terjedő nyomtatási folyamatokat és fejlesszék az eljáráshoz használt anyagokat. Ez növeli a nyomtatott tárgyak megbízhatóságát és tartósságát, valamint segít elkerülni a kritikus, anyagból, és az eljárásból adódó meghibásodásokat. Céлом találni egy optimálisan használható, kifáradásának idejét megállapítható szerkezeti felépítést a nyomtatványok esetében.

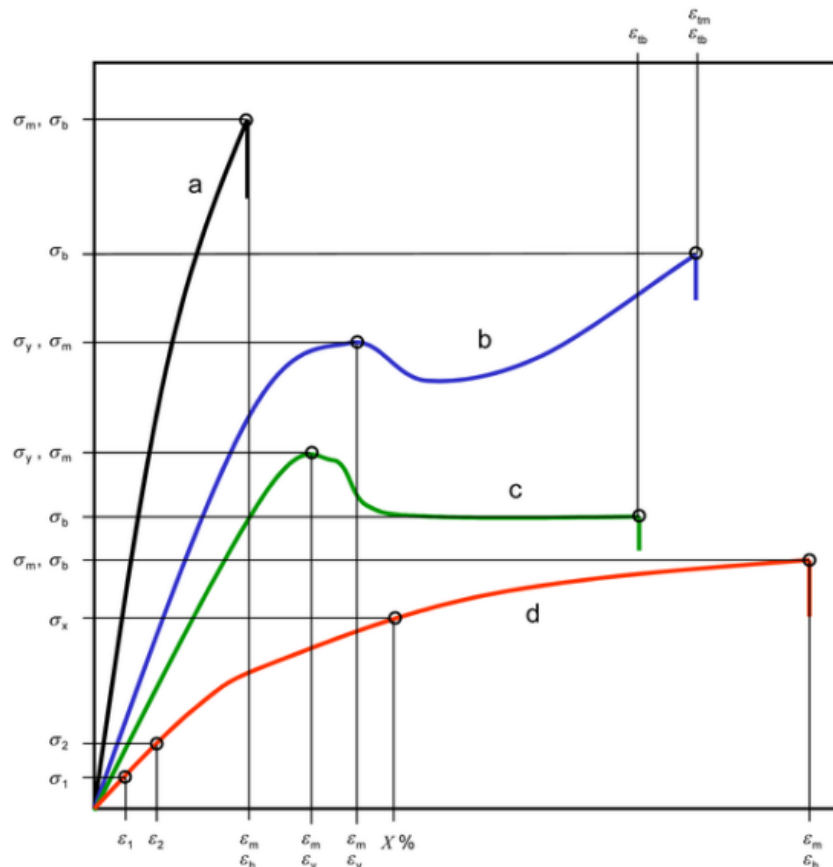
Az interneten tömegesen érhető el oktató anyag, mind magyar mind angol nyelven, az optimális nyomtatvány készítésre alapozva különböző gyártmányú nyomtatókhoz. Viszont fontos kiemelni, hogy ezek csak arra szolgálnak, hogy szép felületű, és-vagy méret pontos tárgyakat készítsünk. A szakdolgozatom célja megállapítani, hogy milyen belső és külső szerkezeti tulajdonságokkal tudjuk ezen tárgyakat szívóssá tenni a dizájn károk elkerülése mellett.

Ezen vizsgálatokhoz célgépre van szükség, amellyel a tanszék rendelkezik. Ez a gépezet kimondottan polimer anyagok ciklikus fárasztására lett tervezve. Azonban az évek alatt elveszett dokumentációját szükséges frissíteni, újra előállítani. Ez okból a szakdolgozat tartalmazza a fárasztás hatásának mérésén felül a fárasztóberendezés rekonstrukciós tervezését is.

1. Szakirodalomkutatás a polimerek fárasztóvizsgálatának vonatkozásában

1.1. A Polimerek vizsgálata

A műszaki műanyagoknak is vannak szilárdsági mutatói, ezek például a nyúlás, szakítószilárdság, és a Young modulus [4]. A polimerek jellemző szakító szilárdsági mutatóit az alábbi 1. ábrán láthatjuk.



1. Ábra: Polimerek szakítógörbéi. a) rideg (üvegszerű) viselkedés, b) és c) nyakképződést mutató viselkedés d) lágy, gumiszerű viselkedés nagy (>50%) szakadási nyúlással [4]

σ_M húzószilárdság: A szakítógörbe első lokális maximumánál ébredő (mérnöki) feszültség. Ez a feszültség egybeeshet a folyási feszültséggel (σ_Y , „b” és „c” görbe), vagy a szakítószilárdsággal (σ_B , „a” görbe).

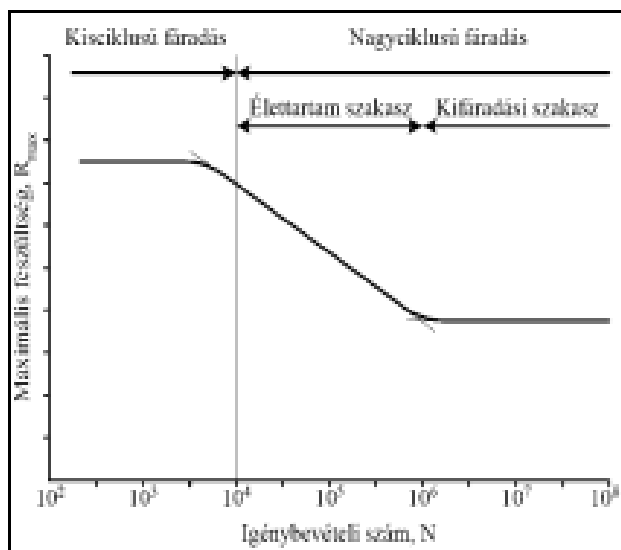
σ_B szakítószilárdság: Közvetlenül a szakadás előtti pillanatban mért erő és a kezdeti keresztmetszet hányadosa.

σ_y folyási feszültség: Az az első feszültség, amelynél a nyúlás a feszültség növekedése nélkül növekszik (szakítógörbe nyúlás szerinti deriváltja itt nulla). A viszkoelasztikus viselkedésű polimereknél sokszor alacsony feszültségeknél is maradó alakváltozások alakulhatnak ki (kúszás), vagyis egyfajta folyási jelenség már hamarabb is jelentkezik, tehát folyáshatár nincsen. A gyakorlatban bizonyos polimereknél fel sem lép a folyási jelenség, másoknál több száz %-os folyási alakváltozás következhet be [4, 6].

Azonban a ciklikus igénybevételekkel szemben mutatott ellenállásukat nem ismerjük széleskörűen. A gyors prototípus eljárásokkal készített műanyagok kifáradási tulajdonságai egyáltalán nem kerültek meghatározásra.

A kifáradást fémek anyagok esetében, a próbatestben jelentkező képlékeny alakváltozás, elcsúszás vagy diszlokációs mozgás, okozza. Nagyon alacsony terhelések esetén a felülettel érintkező, csúszásra orientált szemcsékben következhet be képlékeny alakváltozás.[5]

A képlékeny alakváltozás mértéke a terhelés növekedésével arányosan emelkedik mígnem arányuk eléri a 100%-ot, ami folyáshatárral megegyező mennyiségű igénybevételt jelent. Ezáltal a terhelés növekedésével párhuzamosan a próbatest élettartama folyamatosan csökken, a fáradási folyamat további lépéseivel, a repedés- keletkezés és terjedés fázisainak megismerésével jutunk el, a hagyományos Wöhler görbéhez, amit a 2. ábrán láthatunk [15].



2. Ábra: Szerkezeti acélok Wöhler-görbéje [20]

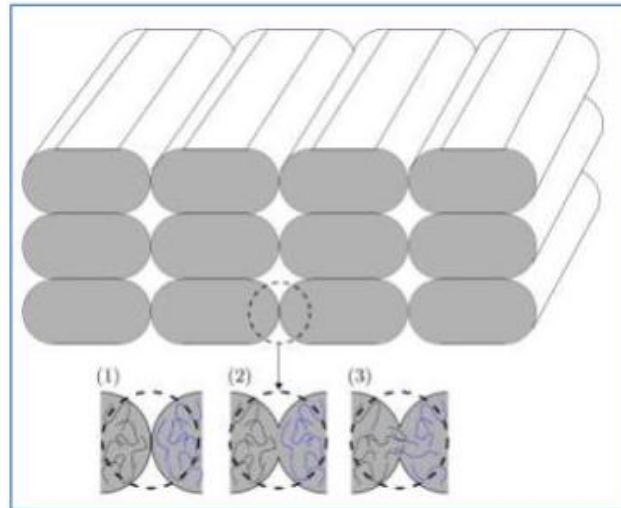
A fémekéhez hasonló kifáradási határ polimerek esetén nem állapítható meg. A vizsgálatokat általánosan 10^7 ciklusszámig végzik és az ehhez, vagy más terhelési ciklusszámhoz, adott vizsgálati frekvenciához, környezeti hőmérsékletéhez,

nedvességtartalomhoz és törési valószínűséghez tartozó igénybevételi számot adnak meg kifáradási határként. A szakirodalmakban sokszor a kifáradási határ és a rövid idejű terhelés esetén mért szilárdsági mutatók hányadosát adják meg. A polimerek tönkremeneteléről átfogó, mérésekkel alátámasztott módszer a fémekkel ellentétben nincs kidolgozva [7,14]. Általánosságban a gyártó cégek az ő saját anyagaikra érvényes javaslatokat adják meg melyek iránymutatásként használhatók [7,16]. Ezért van szükség ténylegesen a gyors prototípus gyártási eljárásokkal készült azonos méretű próbatestekkel való vizsgálatok elkészítéséhez.

1.2. Az FDM nyomtatás hatása a kifáradásra

Az egyik legközkedveltebb, legolcsóbb anyag 3D nyomtatásra a PLA (Polylactic acid – politejsav) melyet magas keményítő tartalommal rendelkező gabonafélékből állítanak elő tejsavas erjesztéssel. Olvadáspontja 160 °C körüli. 190-200 °C-on könnyen feldolgozható, vízben nem oldódó. Kemény, 50-60 MPa szakítószilárdságú anyag. Prototípusok, makettek, modellek, és bemutató anyagok nyomtatására kiváló, viszont alkatrészek készítésére kevésbé alkalmas az alacsony, 55-58 °C körüli üvegesedési hőmérséklete miatt és azért, mert nedves, szennyezett környezetben pár hónap elteltével megkezdődhet a biológiai lebomlása. A PLA nyomtatása során nincs szükség fűthető tárgyasztalra, de a jobb tapadás eléréséhez ajánlott az asztal fűtésének használata. Különbféle adalékanyagokkal, illetve a kristályossági hányad növelésével az üvegesedési hőmérséklet akár 90-100 °C közé javítható, de ez esetben a keménysége kisebb lesz, és a szakítószilárdsága akár meg is feleződhet, egészen 25-30 MPa értékig. Megjegyzendő, hogy a 3D nyomtatókhoz használható alapanyagok estében az adatlapokon az üvegesedési hőmérséklet helyett sokszor a Vicat-féle lágyulási pontot, vagyis az üvegesedési hőmérsékletéhez közel eső HDT (Heat Distorsion Temperature) hőmérsékletet tüntetik fel. Mindhárom hőmérséklet arról ad információt, hogy hány fokon kezd deformálódni a műanyag [2,11].

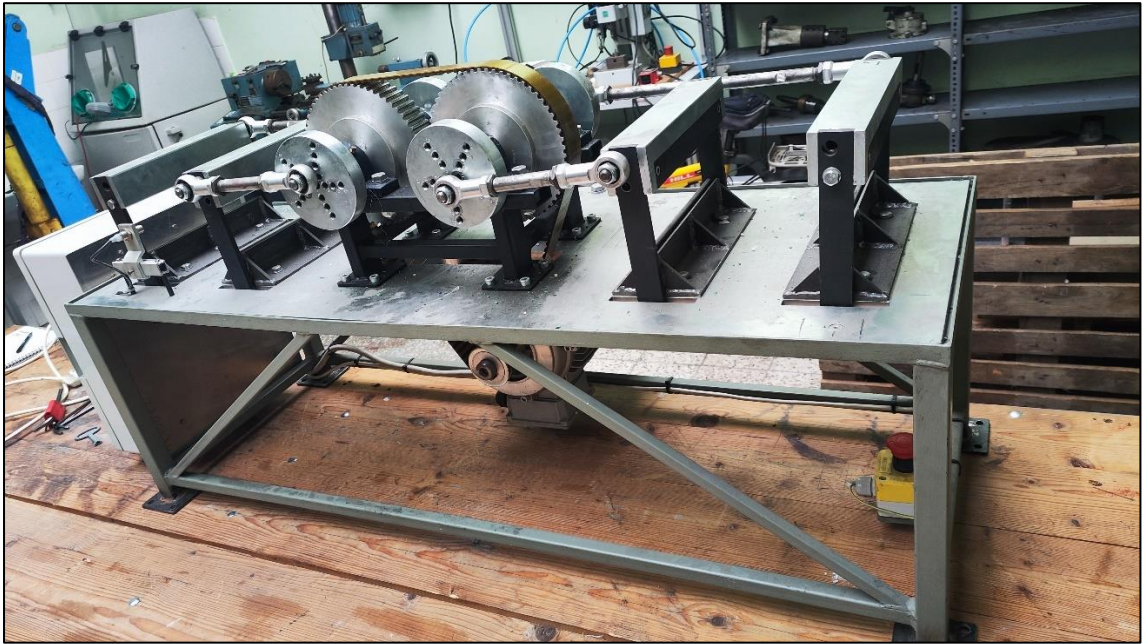
Az anyag további paraméterei hatásainak vizsgálata előtt azt kell megismerni, hogy miként jön létre az adott mintadarab a FDM nyomtatás során. A 3. ábrán látható egy 3D nyomtatási részlet sematikus rajza. A nyomtató a fűvókából extrudáció segítségével olvadt polimert juttat a nyomtatandó felületre. Bár a fűvóka kör keresztmetszetű, azonban a magas nyomtatási hőmérséklet miatt a hengeres ömledék szétterül, és keresztmetszete inkább ellipszis alakzatot formál.[12, 14]



3. Ábra: A szálak kötődése egymáshoz 3D nyomtatás során: (1) érintkezés, (2) nyak képződés, (3) diffúzió [9]

A fúvókából kipréselt magas hőmérsékletű polimer szál érintkezik a szomszédos, hidegebb szálakkal (3-as ábra: 1-es pont) és így konduktív hőátadással biztosít annyi energiát, hogy a két szál között úgynevezett „nyak” képződhessen, vagyis a két szál határfelülete eltűnjön (3-as ábra: 2. pont). Ezen a nyakon keresztül történik a két szál molekuláinak diffúziója, keveredése (3-as ábra: 3. pont), ami anyag és energia transzport hozzájárulásával erős kötést biztosít a frissen nyomtatott és a korábban már lerakott szálak között. A diffúzió az üvegesedési hőmérsékleten már elkezdődik. Magasabb hőmérsékleten nagyobb a részecskék mozgása, így nagyobb a diffúzió sebessége is. Ezen kötések minősége, és összeolvadtsága nagyban befolyásolja a fárasztandó mintadarabok viselkedését [11,17].

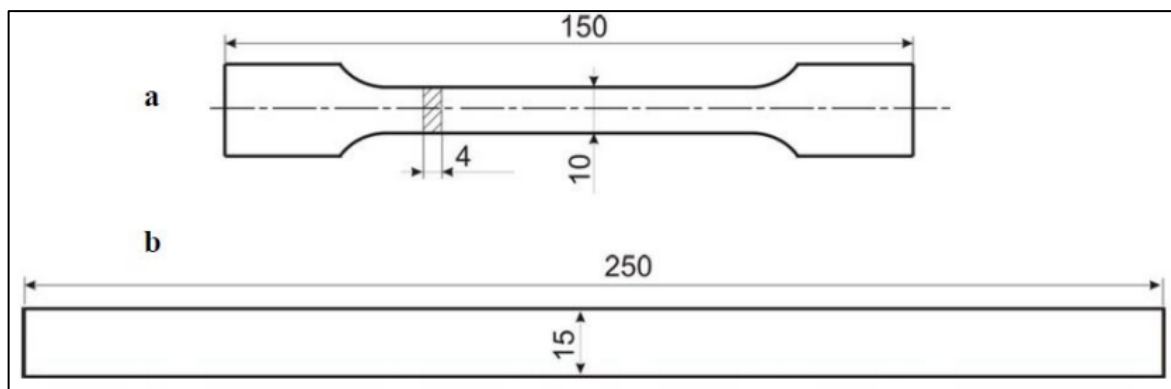
1.3. A tanszéken található polimerfárasztó berendezés



4. ábra: A Neumann János Egyetemen található polimer fárasztó berendezés

A kifáradásra való méretezés alapja a fárasztóvizsgálatok segítségével megállapított kifáradási határ [6]. Ezen információk megszerzéséhez méréseket kell végrehajtani, melyhez a feladatkiírásban szereplő berendezést fogom használni, ami a fenti 4-es számú ábrán látható. [21,22]

A Neumann János Egyetem járműtechnológia tanszékén található polimerfárasztó gép Sebők Gergely tanszéki mérnök és Fodor Antal műszaki tanár nevéhez kötődik, melynek fejlesztése 2010 márciusában valósult meg [9]. A szerkezet szabványos szakító próbatestek befogadására lett tervezve, ezért a feladatkiírásnak megfelelően a fárasztások és mérések elvégzéséhez szabványos munkadarabok gyártására és tesztelésére lesz szükség (4. ábra /(a)) [10]. Az itt szerzett tapasztalatokat fogjuk a későbbiekben átültetni FDM 3D nyomtatási eljárással készült alkatrészek tervezésébe.[20]



5. Ábra Próbatesszt típusok: (a) hőre lágyuló polimer anyagokhoz, (b) kompozit szakító próbatesszt [19]

1.4. Hajlításnál fellépő mechanikai feszültségek

Hajlítás esetén kialakuló hajlítófeszültség a semleges száltól mért y távolság függvényében lineárisan változik.

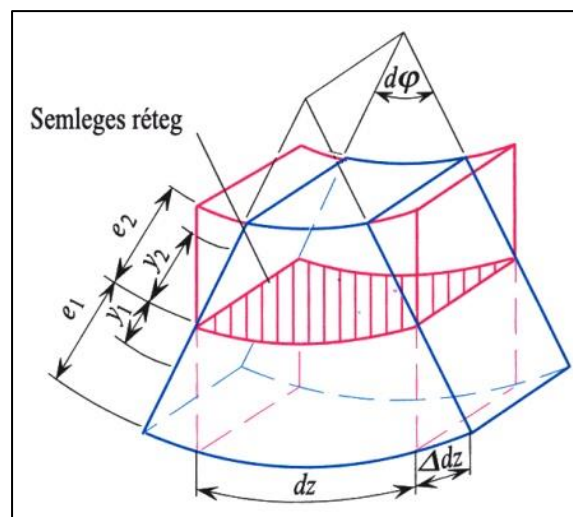
Ez alapján:

$\sigma = c \cdot y$ és emiatt $\sigma_{\max} = -c \cdot e$, ahol $y = a$ a vizsgált szál távolsága a semleges száltól, $e = e_1 = e_2$ a szélső szál távolsága, „ c ” a keresztmetszetet terhelő nyomaték (M) és a keresztmetszet geometria kialakításától függő tehetetlenségi nyomatékának (I) hányadosa.

A feszültség $\sigma = \frac{M}{I} \cdot y$, illetve $\sigma_{\max} = \frac{M}{I} \cdot e$.

A hajlító igénybevétel esetén is érvényes a Hooke-törvény, ami alapján csak rugalmas alakváltozás jöhet létre, így a szélső szálakban ébredő $\sigma_{\max}$ feszültségre is vonatkozik az az összefüggés, hogy $\sigma_{\max} \leq \sigma_{meg}$, ahol σ_{meg} a vizsgált szerkezet anyagára megengedhető feszültség.

A műanyagokban a hajlításakor fellépő anyagszerkezeti igénybevételek ugyan úgy jelen vannak, mint a fémek esetében. A különbséget a rugalmas alakváltozás tulajdonságának szélesebb skálája adja a polimerek esetében. Ezen anyagok esetén,



6. Ábra: A semleges szál sematikus ábrázolása méretekkel, hajlításnak kitett fémek esetében. [18]

figyelembe veendő mechanikai tulajdonságai eltérőek a fémekhez viszonyítva a hajlítás során:

- • a húzó és a nyomó rugalmassági modulusok nagymértékben különbözhetnek, ami a semleges szál (a 12. ábrán látható,) eltolódását okozza,
- • a feszültség-alakváltozás kapcsolata nem lineáris,
- • viszonylag kis terhelésre is nagy alakváltozás léphet fel,
- • kicsi a fajlagos tömegük [3, 18].

2. A tanszéken található berendezés rekonstrukciós folyamata

A berendezés digitalizálására a leendő felhasználók munkájának megkönnyítése végett van szükség. A digitális modellel képesek lesznek szimulált fárasztásokat végezni, ezzel nagyban gyorsítva és megkönnyítve a méréseket. Ezáltal csökkentve a szükséges idő és anyag igényeket. A rekonstrukciós folyamat kizárólag a mechanikai alkatrészekkel foglalkozik a szakdolgozat folyamán, az elektronikai alkatrészeket nem szükséges jelen esetben figyelembe venni.

2.1. A berendezés szétszerelése

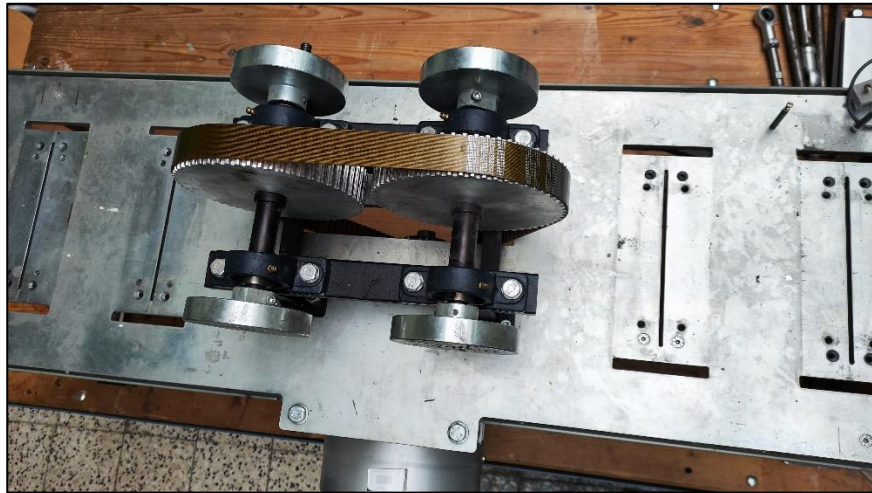
A polimer fárasztógép digitalizálásához szükség van az azt alkotó alkatrészek méretére, ezért esedékes a berendezés szétszerelése. A szétszedés mértéke függ az elemek mérhetőségétől, ezáltal nem szükséges teljes mértékben szétbontani a rendszert kivéve, ha valamely mérendő felület ezt megköveteli.

A berendezés oldható kötésekkel lett összeállítva így roncsolásos szétválasztásra nem lesz szükség, kizárólag kézi szerszámok és kisebb berendezések használatára. A mi esetünk ezen eszközök a következők:

- 10, 13, 17, 19, 21, 22, 24-es villáskulcs
- 13, 19- es dugókulcs
- 4x80, 10x200 lapos fejű csavarhúzó
- zégergyűrű fogó
- asztali satu
- 4-es és 5-ös imbuszkulcs
- PH1-es csillag fejű csavarhúzó
- szerelő asztal

- 20-100mm belső átmérőhöz csapágylehúzó készülék
- 20-100mm külső átmérőhöz csapágylehúzó készülék
- Freescan ue pro kézi 3D scanner

A bontás menetét szemrevételezés alapján határoztam meg. A sorrendet a könnyebben elérhető elemek eltávolítására alapoztam. Először kiszedtem az alsó minta befogó pórákat. Leszereltem a mozgató rudakat, majd eltávolítottam a felső munkadarabbefogó egységeket. Ezután az alapról leszedtem a minta befogó maradék részeit, és elemeire bontottam. Majd a középső állványzat következett, ahogy az a 7. ábrán látható.



7. Ábra: A főtengelyeket tartó szerkezet elhelyezkedése.

A szétválasztott elemeket a munkaasztalon rendszerezve, illetve a kisebb elemeket az erre előkészített tálkában helyeztem el (8. ábra), amíg a méreteket átvittem digitális formába a következő alfejezetben taglalt módon.



8. Ábra: A kiszerelt alkatrészek elhelyezése, tárolása.

2.2. Alkatrészek mérése

A mérések végrehajtásához több eljárás volt lehetséges:

1. táblázat: A Méretek megállapításának lehetséges eljárásai

1. Az összes elem 3D szkennelése	2. Kézi mérőeszközökkel való méret felvétel	3. Szemrevételezéssel való megállapítás (makró vizsgálattal)
4. gyors	5. lassabb	6. nagyon gyors
7. kis energia befektetés	8. sok idő és munka	9. nagyon kevés energia befektetés szükséges
10. sok utómunkálattal jár	11. kevés utómunka	12. sok utómunka
13. nehezen javítható leképezések	14. könnyen javítható értékek	15. nem elegendő pontosság a szerkezet rekonstrukciójához

A választás a kézi mérőeszközökkel való mérésre bizonyult megfelelően pontosnak, és feldolgozhatónak. Az osztótárcsa furatkiosztása nem bizonyult kézi szerszámmal mérhetőnek, ezért ezt az elemet szükséges volt 3D szkennelssel beolvasni.

A méréshez használt eszközök a következők voltak:

- colostok 2m-es hosszúsággal
- egytetemes tolómérő 0-150 mm-es mérési tartománnyal és 0,02 mm-es pontossággal
- mérőszalag 5m-es hosszúsággal
- toll
- jegyzetfüzet
- fényképezőgép

Az elemekről skiccet készítve füzetbe jegyzeteltem le a méreteket, majd a skiccek alapján kezdtem a digitális alkatrész megrajzolását melyről a következő alfejezet szolgáltat bővebb információt.

2.3. A 3D modell elkészítése a gép mechanikai részeiről

A háromdimenziós rekonstrukciós rajz elkészítéséhez, a mérőeszközökkel mért méretek pontos, esetenként kerekített értékének digitalizálásához olyan programra volt szükség, ami képes pontos adatok bevitelére, könnyen módosítható, jól integrálható más formátumokba, programokba, rendelkezik belső alkatrész- eszköztárral, jól követhető az alkatrészek módosítása, összeállításokat is képes létre hozni, gyors és egyszerű 3D-s felület létrehozásra képes, alkalmas ponthalmaz alapú fájl beolvasására. Ezen szempontok előfeltételén történő választás az alábbi táblázat alapján történt, a pontozás 0-10 pont közötti skálán értékelttem.

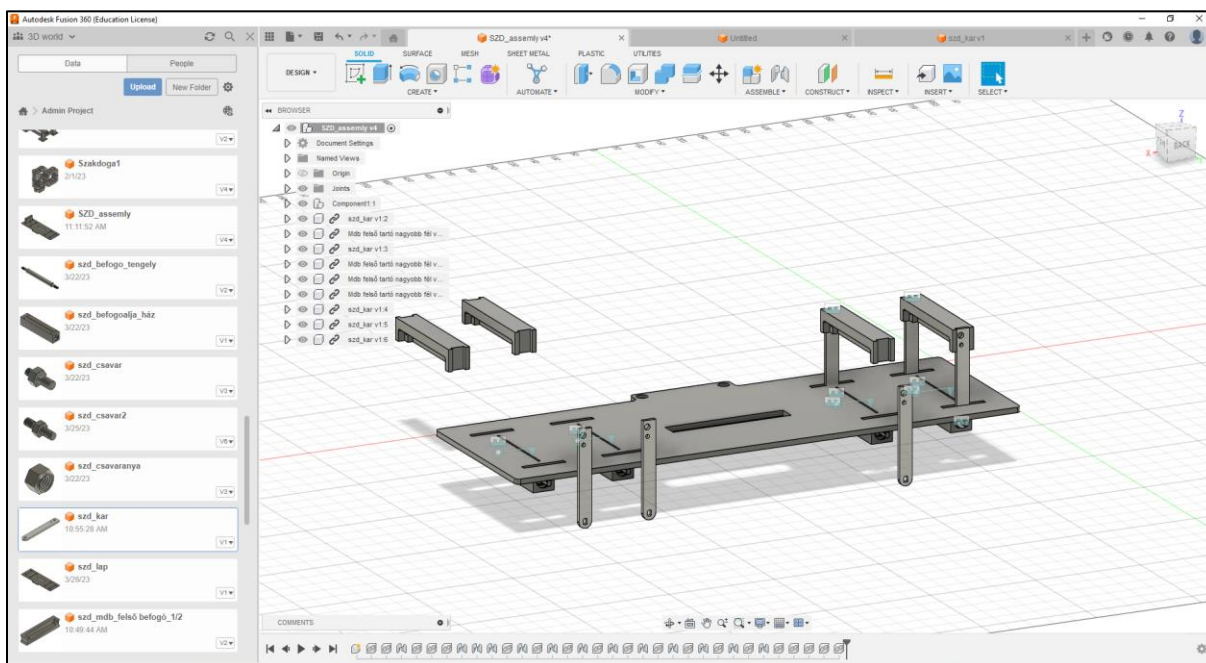
2. táblázat: A 3D-s rekonstrukciót támogató software kiválasztása

Szempontok	Fusion 360	Inventor	AutoCAD	Creo
képes pontos adatok bevitelére	10	10	10	10
könnyen módosítható	8	7	6	7
jól integrálható más formátumokba	8	6	7	5
rendelkezik belső alkatrész-eszköztárral	10	9	4	10
jól követhető az alkatrészek módosítása	8	6	2	6
összeállításokat is képes létre hozni	10	8	0	7
gyors és egyszerű 3D-s felület létrehozás	10	4	7	4
alkalmas ponthalmaz alapú fájl beolvasására	7	0	0	0

A választás a legtöbb pont alapján történt. Így a 71 ponttal rendelkező Fusion 360 nevű programmal készítettem el a háromdimenziós alkatrészek rajzát és végül a rekonstruált, összeállított gépet.

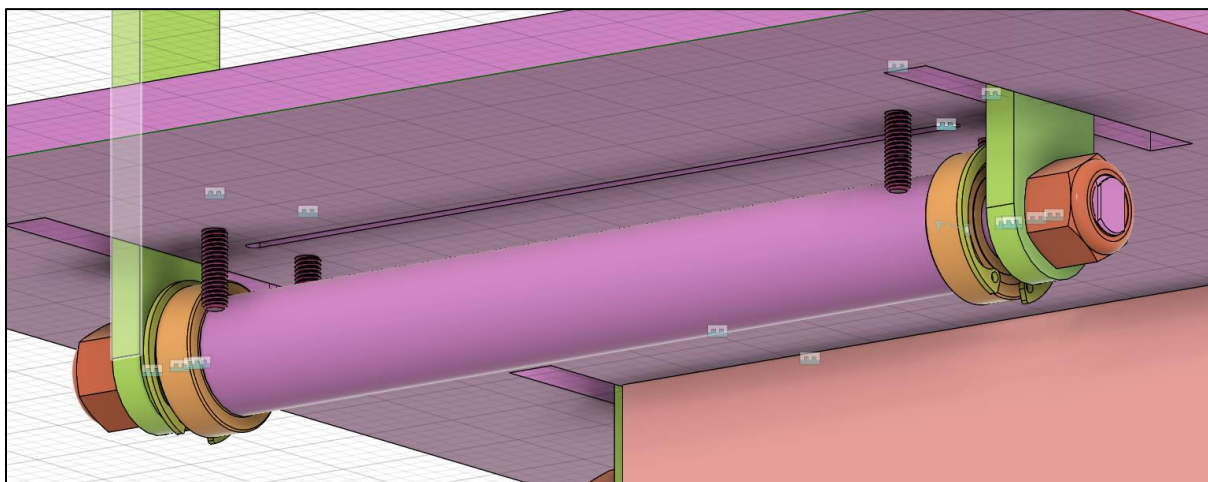
A rajz elkészítését a szerelés menetéhez hasonló sorrendben végeztem el. A mozgókarok és a befogó pófákkal kezdtem, majd az alapot képző lemez következett. Sorban létrehoztam a többi alkotóelem 3D-s rajzát, kivéve a szabványos kötőelemeket és a működtető elektromotor rajzát. Ezeket a software-ből implementáltam, illetve a motor, és a bordásszíjtárcsák rajzát a gyártók honlapjáról töltöttem le, a pontos értékek érdekében.

Amikor elkészültek az alkatrészrajzok elkezdtem az összeállításukat, ahogy az az alábbi 9-es számú képen látható.



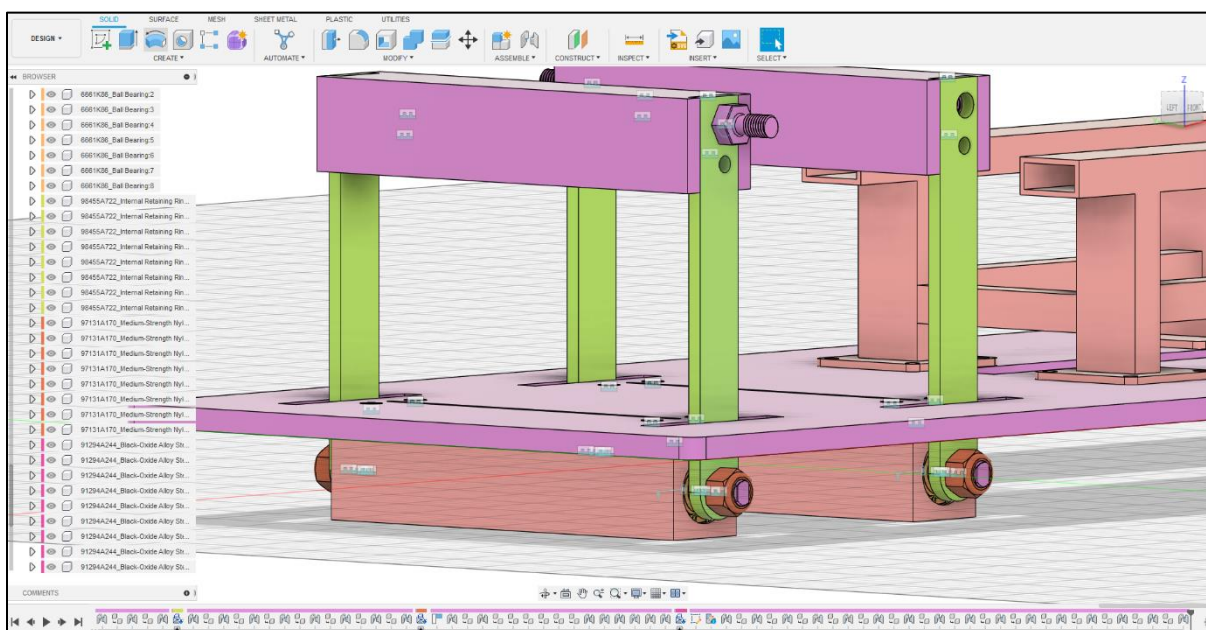
9. Ábra: Az alaplemez és a mozgókarok kezdeti összeállítása a programfelület megjelenítésével együtt.

Az alkatrészek kényszerezése a valóságnak megfelelően történt, hogy a mozgó alkatrészek a számukra szükséges íven mozogjanak, valamint a kötések egyáltalán ne tudjanak elmozdulni egymáshoz képest.



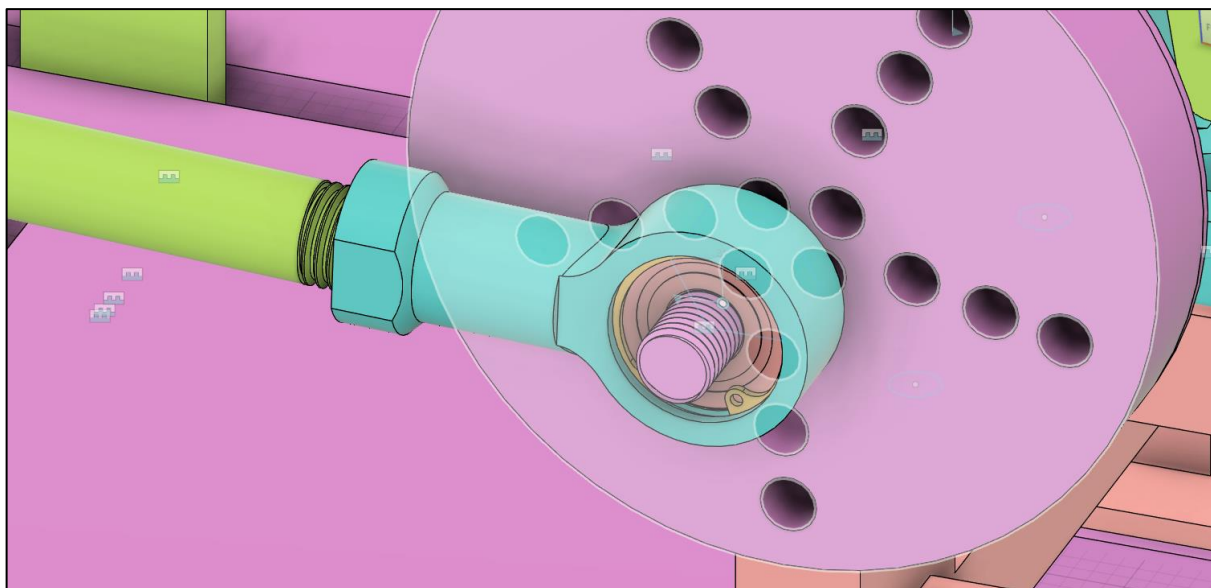
10. Ábra: A mozgó karok és annak tengelyének csapágyazása a rögzítő házban.

Az alkotóelemek jól megkülönböztethetősége érdekében a tervezőprogram beépített alkatrész színező funkcióját használtam. Ennek köszönhetően jól elkülöníthetőek az alkatrészek, és könnyen megállapítható a modellfában való elhelyezkedésük.

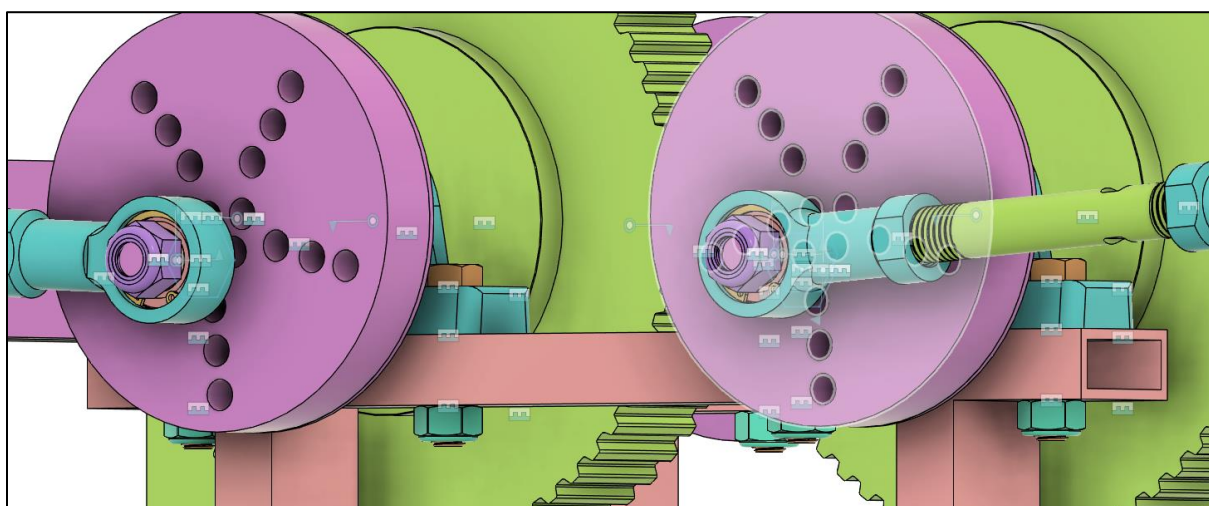


11. Ábra: Az összeállított mozgókar mechanizmus, mozgatórúd nélkül, modellfa részlettel a baloldalon.

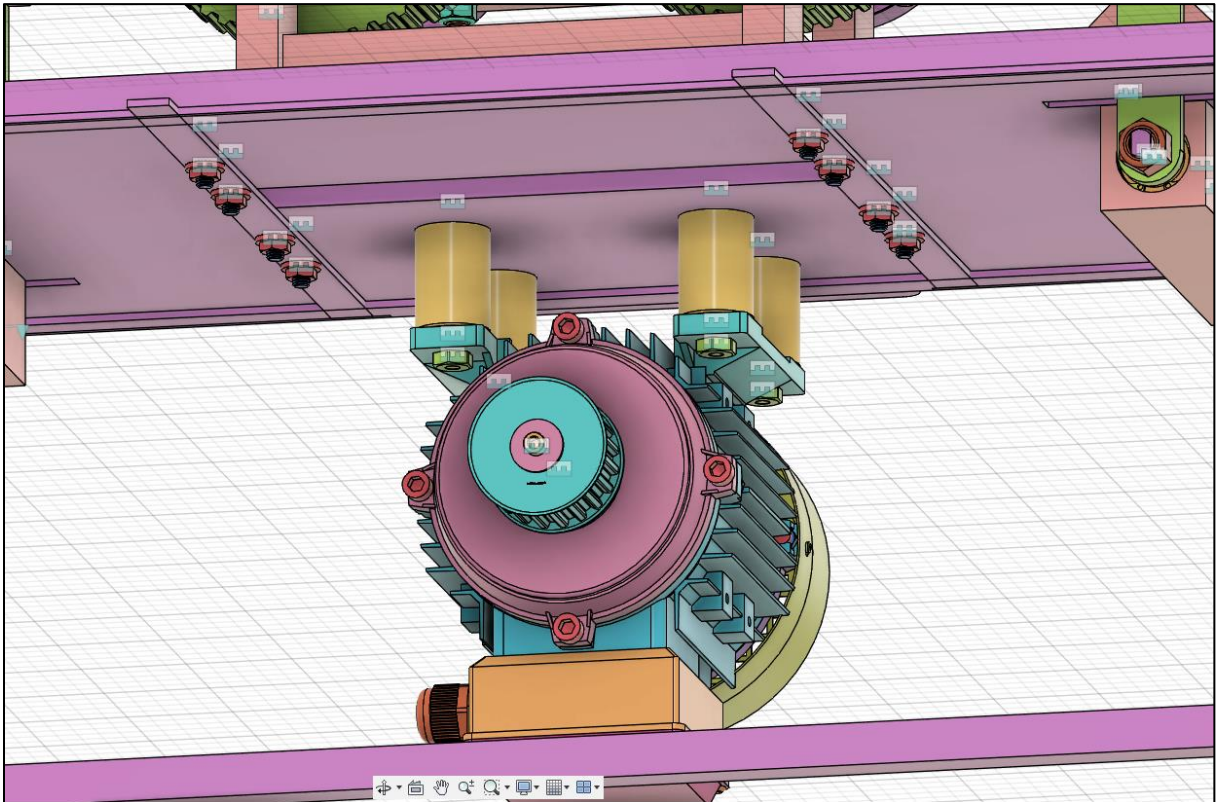
Az osztótárcsák 3D szkenneléssel kerültek digitalizálásra ezért felületet kellett illeszteni a beolvasott ponthalmazra. Az elkészült tárcsa így 99%-os alakpontossággal közelíti a beolvasott elem méreteit.



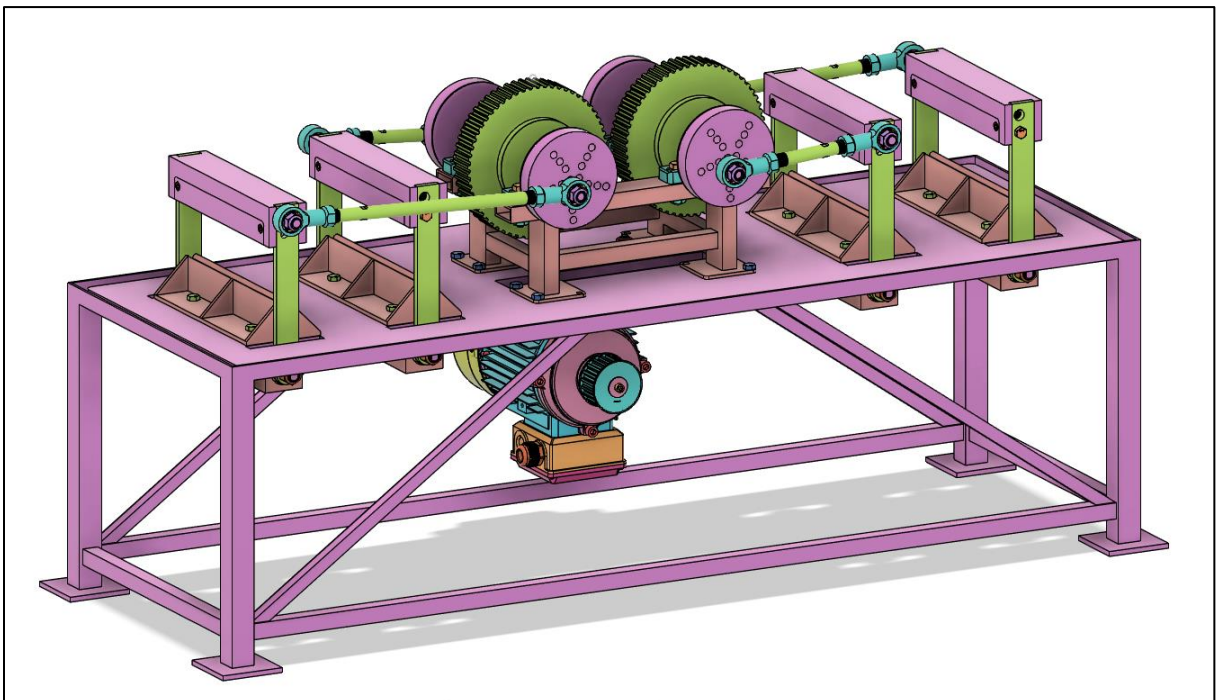
12. Ábra: az osztótárcsa és a mozgó rúd bekötése, csapágyazása



13. Ábra: A főtengelyek csapágyazása, és elhelyezkedése az állványon



14. Ábra: Az elektromotor elhelyezkedése a szerkezet alatt.



15. Ábra: A fűrésztő gépezet elkészült 3D-s modellje

2.4. A berendezés összeszerelése

A rajz elkészülését követően, már nem volt szükség esetleges utó mérésekre, így el lehetett kezdeni az összeállítást. Az összeszerelés a szétszerelés fordított sorrendjében történt a bontáshoz használt eszközökkel, ügyelve, hogy az összes alkatrész oda kerüljön vissza, ahonnan lekerült a berendezésről. Az összeállítás alatt törekedtem az osztótárcsán úgy rögzíteni a karokat, hogy a fűrésztárcsához szükséges kihajlási mértékhez tartozó menetbe illesszem a leendő megbontást elkerülendő.

Az összeállított berendezés kötéseit utólagosan is ellenőriztem, hogy a forgás képes kötés tud forogni, illetve a szilárd kötés nem mozog, lötyög. A kész berendezést ezután próba üzemmel teszteltem, hogy ténylegesen el tudja látni még a feladatát a szerelést követően is.

3. Polimer próbatestek készítése kísérlet-terv szerinti additív eljárással

3.1. Az FDM típusú additív eljárás leírása

A gyakran additív gyártásnak is hívott 3D-nyomtatás olyan gyártófolyamat, mellyel szilárd tárgyak, termékek állíthatók elő egy számítógép által létrehozott digitális fájlból. Ahogy a név is takarja, az eljárás során additív folyamatokat alkalmaznak a termék gyártásához. Ezek a folyamatok progresszív anyagrétegek egymásra építésével hozzák létre a kívánt alakzatot, ahol az egyes rétegek tulajdonképpen tekinthetők a termék egy-egy szűk keresztmetszetének [x].

A 3D nyomtatás jelentősen eltér az egyéb, jellemzően szubtraktív gyártóeljárásoktól, hiszen anyageltávolítás helyett anyag hozzáadásával jár együtt. Ennek köszönhetően bonyolult alakzatok is kevesebb anyag felhasználásával hozhatók létre [x].

A 3D nyomtatás alapját képezi a slicer (daraboló) program, melynek feladata a készítendő munkadarab háromdimenziós modelljének vertikális darabolása rétegekre, hogy a nyomtatónak milyen pályát kelljen bejárni a minta elkészítéséhez.

A piacon nagyon sok slicer program érhető el mind fizetős mind ingyenes felhasználásra.

Példaképpen a következő oldalon olvasható néhány ismertebb.

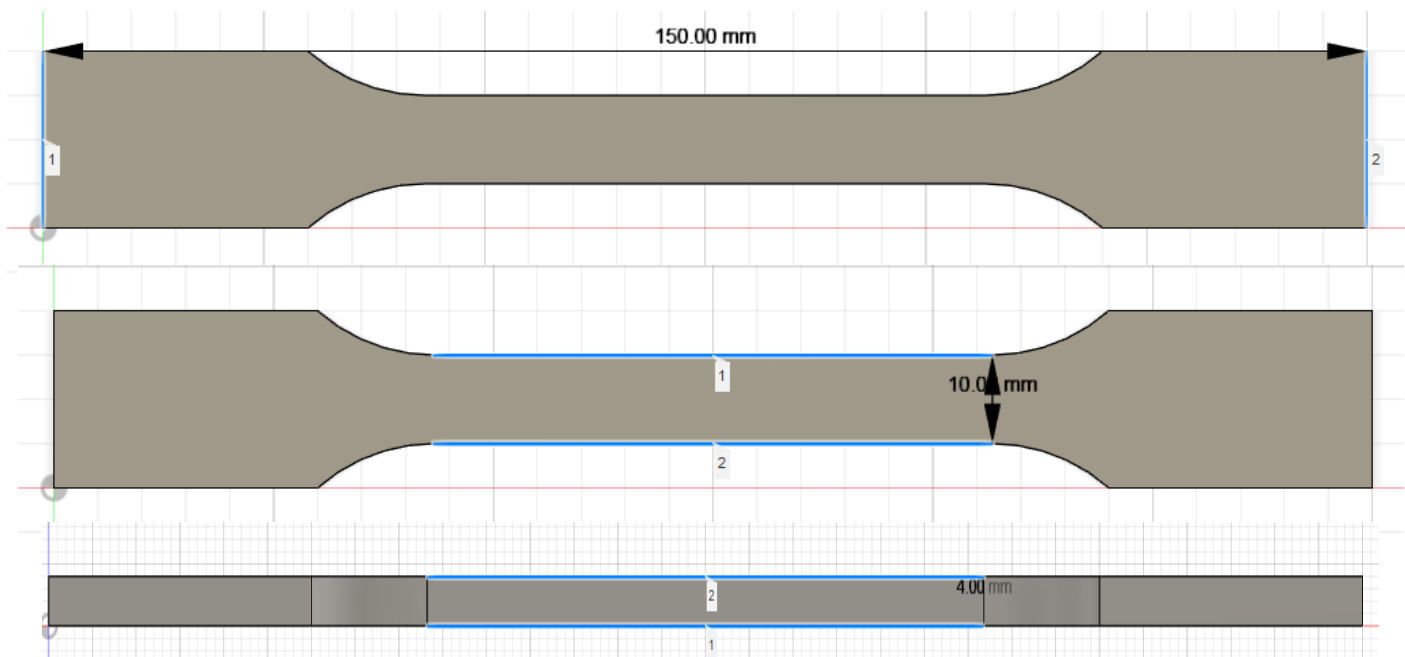
Cura	Kezdő, Haladó felhasználó	Ingyenes, Professional \$50/hó, Excellence \$1,000/ hó
Simplify3D	Kezdő, Haladó felhasználó	\$149
PrusaSlicer	Kezdő, Haladó felhasználó	Ingyenes
ideaMaker	Kezdő, Haladó felhasználó	Ingyenes
OctoPrint	Gyakorlott, Haladó felhasználó	Ingyenes
Astroprint	Kezdő, Haladó felhasználó	Ingyenes, Pro \$9.90/ hó
ChiTuBox	Kezdőtől Profi Felhasználóig	Ingyenes, Pro \$169/ év
Netfabb	Gyakorlott, Haladó felhasználó	Standard (megújított) \$230/ év, Premium \$4,870/ év
Slic3r	Haladó és Profi Felhasználó	Ingyenes
IceSL	Haladó felhasználó	Ingyenes
MatterControl	Kezdő, Haladó felhasználó	Ingyenes
Repetier	Gyakorlott, Haladó felhasználó	Ingyenes
CraftWare Pro	Kezdő, Haladó felhasználó	Free, Premium \$99.99/év, Premium Enterprise \$499.99/ év
Z-SUITE	Kezdő	Ingyenes
MakerBot Print	Kezdő	Ingyenes
SelfCAD	Kezdő, Haladó felhasználó	Ingyenes demo, \$14.99/ hó
3DPrinterOS	Haladó és Profi felhasználó	Freemium
KISSlicer	Kezdő, Haladó felhasználó	Ingyenes, Pro \$35, Premium \$40

[1]

A felül felsoroltak csak párok az elérhetőek közül. A fizetős programok általában saját fejlesztésűek, míg az ingyenesek többsége a Cura software klónja és túlnyomóan butított verziója. Gazdasági szempontból az ingyenesek közül választottam, és mivel a Cura olyan kiemelkedő, hogy más programozók is másolják, ezt a programot választottam. További előny, hogy kezdő és haladó felhasználásra tervezték, így biztosan el tudtam sajátítani a szükséges ismereteket a program használatához.

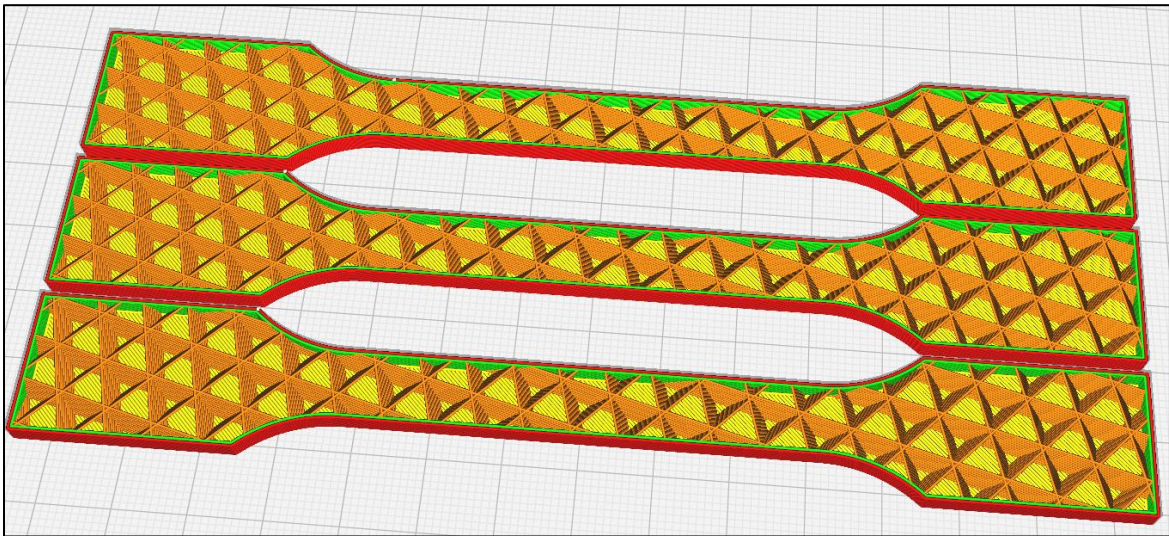
3.2. A próbatestek kialakítása

A fārasztandó minták tulajdonságait valahogy mérni kellett, hogy miként viselik a fārasztást ezért, a szabványos szakító próbatestek alakjára és méreteivel készültek a munkadarabok. A lenti (16.) ábrán látható testet szintén a Fusion 360 programmal készítettem, mivel ebből a programból rögtön exportálható a modell a Cura slicer-be.



16. Ábra: Rajzolt próbatest háromdimenziós méretei

3.3. A próbatestek elkészítése



17. Ábra: A slicer software programtervezet nézeti módjában látható nyomtatandó munkadarabok.

A daraboló program segítségével különböző tulajdonságú, de azonos méretű mintákat tudtam készíteni (a 17. ábrán láthatóhoz hasonló darabokat) mely célja, hogy megismerjük mely beállítások, kialakítások befolyásolják erősebben a leendő FDM nyomtatással készült alkatrészek kifáradást. Ezen tulajdonságukat úgy fogjuk megállapítani, hogy szakító vizsgálatot hajtunk végre a különböző típusokból készült munkadarabokon fárasztási teszt nélküli darabokon és endurance teszt utáni mintákon.

A különböző kialakításokból 3-3 mintát nyomtattam és betű-szám kombinációval neveztem el őket a megkülönböztetés végett az alábbi jelmagyarázat alapján:

Fájl neve: E_szd2_0.2_200C_w2_tb2_tbp-lines_f20-cubic

- „E”: Típus könnyített megkülönböztető neve
- „szd2”: Próbabeállítások száma
- „0.2”: Rétegvastagság mm-ben
- „200C”: Nyomtató fej hőmérséklete
- „w2”: Munkadarabot határoló falak és számuk
- „tb2”: A minta aljának és tetejének rétegszáma
- „tbp-lines”: Az alsó és felső rétegek kitöltésének útja (csíkok oda vissza 45 fokban az alsó falhoz képest és keresztben az alatta lévő réteghez képest)
- „f20-cubic”: A test kitöltöttsége %-ban és a kitöltés alakja

Ezen megnevezési sémával az alábbi 5 típust készítettem el:

- A_szd2_0.2_200C_w2_tb4_tbp-lines_f20-cubic
- B_szd2_0.2_200C_w2_tb4_tbp-lines_f60-cubic
- C_szd2_0.2_200C_w4_tb4_tbp-lines_f20-cubic
- D_szd2_0.2_200C_w999_tb999_tbp-concentric_f100-concentric (tömör test)
- E_szd2_0.2_200C_w2_tb2_tbp-lines_f20-cubic

A fenti típusokból végül az első négy került sorozatgyártásra és fűrésztásra, mert a berendezés, amivel a mintákat terheljük négy különálló befogóval rendelkezik, és egy befogóba csak egy típust tettünk a pontosabb értékek kinyerése érdekében. Másik ok pedig, hogy maximáltuk a típus nyomtatványokat maximum 6 különböző tulajdonságban és hogy csak annyi fűrésztást csinálunk amennyiben minden befogóba jut adott típusú munkadarab. Azaz nem engedélyeztünk részleges üresjáratot. Továbbá rögzítettük a nyomtatási hőmérsékletet, hogy az abból adódó szerkezeti változások ne játszanak szerepet, hanem optimálisak legyenek számunkra. Az optimális nyomtatási hőmérséklet beállításával kapcsolatban nagyon sok oktató, illetve informáló videó készült a megosztó portálokon így, ezt a területet lefedettnek tekinthetjük.

A próbatestek nyomtatásához egy saját, közép kategóriás, nem ipari berendezésnek minősülő FDM nyomtatót használtam mely a 18. ábrán látható, és a tulajdonságai az alábbiak:

Berendezés: Creality Ender 5

Termék információk és technikai adatok

Cikkszám: CRE-1001020051

Gyártói szám: 1001020051

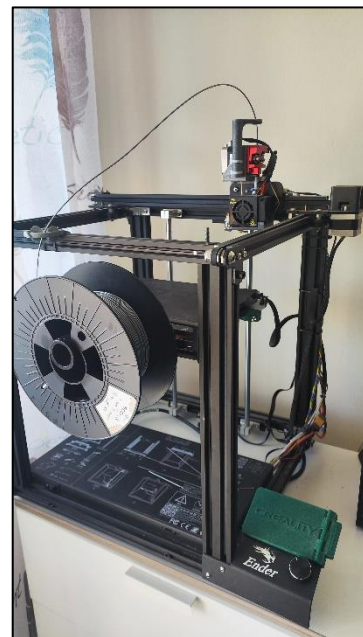
Márka (Gyártó): Creality

Terméktípus: 3D nyomtató

Fűvóka forma: MK8

Nyomtatási technológia: FFF - FDM - LPD

Nyomtató-Display: LCD - Display



18. Ábra: A vizsgált minták elkészítéséhez használt, Creality Ender 5 nyomtató

Támogatott operációs rendszerek:

Windows (7 +), Mac OS X (10.7 +), Linux (Ubuntu 12.04 +)

Extruder típusa: Direct drive extruder

Extruderek száma: egy

Interfészek: USB, SD - kártya

Támogatott formátumok (Slicer): STL, OBJ

Fűtött nyomtatótér: igen

Fűvóka átmérő: 0,4 mm

Filament átmérő: 1,75 mm

Nyomtatótér [HxSZxM]:220 x 220 x 300 mm

A berendezés egyénileg tervezett további fejlesztésekkel van ellátva, mint például:

- 360°-os tárgyhűtő fűvóka
- Direct drive extruder tartó
- Tárgy tálca merevítés
- Filament megvezetés

3.4. Az elkészült próbatestek ellenőrzése

Az FDM nyomtatási eljárással készült munkadarabokat érdemes figyelemmel kísérni mind gyártás közben mind annak befejeztével átvizsgálni a kész tárgyat. Az eljárás egy nagy hátránya, hogy a nyitott munkatérrel rendelkező gépek munkáját nagyban nehezítik a környezeti viszonyok úgy mint: hőmérséklet, páratartalom, légmozgás, por. Ezen jelenségek nagyban befolyásolják a munkadarabunk minőségét. Általános problémák lehetnek a megfolyások, rossz beállítások miatt, anyagihiány vagy kisebb kitüremkedések a felületen túl extrudáltság miatt. Ezen jelenségekbe az anyag páratartalma egy folyamatosan változó tényező otthoni felhasználás mellett. Folyamatosan szárazon tartani az alapanyagot szinte lehetetlen, és csak a nagyon nagy gépek rendelkeznek belső anyag tárolóval, amely nincs kitéve a szoba légkörének. Így a víztartalom az anyagban általában folyamatosan nő annak befogadóképességének mértékéig. Emiatt sokszor van szükség után állításra, hogy kompenzáljuk az anyagunk nyomtatási tulajdonságát. Ha nem tesszük meg és nem figyelünk a gépre könnyedén fatális hibát véthet a gép. Ami addig nem okozott gondot az eldugulást (általában poros alapanyag miatt), anyagkimaradást okozhat. Ekkor elkezdünk selejtet gyártani, ami nagyon látványos eseteket ölthet és ha nem figyelünk sok anyag vész kárba ez idő alatt [x].



19. Ábra: A mérés szempontjából elhanyagolható hibákkal rendelkező mintadarabok.

Az ilyen jelenségekből fakadó kisebb-nagyobb hibák azonosítása végett van szükség minden darab ellenőrzésére amikor elkészül. A fenti képen jól látható, hogy a koncentrikus kitöltés miatt nem tudott időben kihűlni a belső terület ezért kidudorodott a nyomtatás alatt. A mérésünk szempontjából ez nem okoz gondot mert a fárasztani és szakítani kívánt rész ép maradt, viszont jól szemlélteti ezt a típushibát.

A négy fő típus mintáiból összesen 48 db készült, amik megfeleltek a szemrevételezéses ellenőrzésnek. A selejtek száma 9db volt a gyártás kezdetén. Ezen darabok segítették a fárasztógép beállítását mielőtt a tesztelni kívánt mintákon megkezdtem a kísérletet.

4. A gyártott próbatestek fárasztása a berendezés segítségével

A fárasztó berendezést, az összeszerelést követően leellenőriztem, hogy képes-e üzemszerűen működni. Megvizsgáltam az illesztéseket és meggyőződtem róla, hogy a kötések megfelelően rögzültek. Ezután 5 perc üres járatás következett szintén ellenőrzési okokból.

4.1. A próbatestek fárasztása

A gépezet fordulatszámának beállítását stopperes kézi számlálóval végeztem el, amíg elértem a másodpercenkénti 2 löketes sebességet a könnyű számíthatóság, és gyors, de nem sürgetett tempójú teszteléshez. Később ezt redukáltam percenkénti 100 löketre. Ezt követően a selejtnek minősített, de jelleg helyes munkadarabok segítségével próba fárasztást hajtottam végre. A gép automatikus leállításáért egy fogyasztáscsökkentőként ismert digitálisan programozható berendezés felelt, mely percre pontos beállítást tett lehetővé. A fordulatszámot ezen beosztás ismeretében kalkuláltam.



20. Ábra: Előtesztelésre szánt selejtes mintadarabok

Az előtesztelő darabok 1000 cikluson keresztül voltak a gépben. Ennek köszönhetően kiderült, hogy a 3 fokos kihajlás felett ezen gép sajátossága miatt túlzott mértékben károsodnak a minták és a teszt befejezése előtt eltörtek. Így a fő tesztadarabok esetében a fárasztás ± 3 fokos kihajlással történt percenként 100 ciklus megtételével.



21. Ábra: Fárasztás közben eltört előtesztelő minták

A tesztelendő darabok 4-4 csoportja három különböző ciklusú fárasztáson esett át. 1000, 10.000, és végül 100.000 ciklusnyi terhelést kaptak. Mindegyik négyes csoport csak az egyik cikluson esett át.

A fárasztás menete a következő sorrendben zajlott:

- Minta darabok elnevezésük szerinti szét szeparálása
- A négy féle három darabos csoportok befogatása a gépbe, szigorúan csak azonos minták kerültek egy befogóba
- Minták rögzítése és ellenőrzése, hogy stabilan be lettek fogva
- Időzítő beállítása az adott ciklusnak megfelelően
- Fárasztás elindítása
- A folyamat felügyelése
- Folyamat vége, automatikus megállás
- Minták kivétele és szemrevételezése, fáradásból adódó repedés, törés vagy anyag vékonyodás végett.

Pozitív észrevétel volt, hogy a ciklusszámtól függetlenül, egyik munkadarabon se volt szemmel látható elváltozás vagy sérülés.

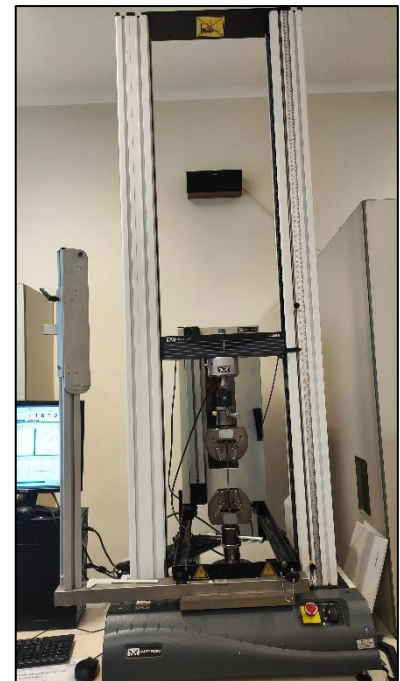


22. Ábra: Fárasztáson átesett munkadarabok. A felületeken látható feketés foltok a befogó által okozott koszolódás.

4.2. A mintadarabok szakító vizsgálata

Az igénybevételnek kitett mintákat és a fárasztás nélküli alapként szolgáló mintákat két körben szakítottuk, amíg a maradék munkadarabok még a hosszabb fárasztáson túllesznek. A szakításhoz az alábbi gépet, illetve beállításokat alkalmaztuk:

- A berendezés: Instron 3366
- Az erőmérő cella mérési határa: $\pm 10\text{kN}$
- Megfogás típusa: standard csúszó ékes befogófejek
- Vizsgálati hőmérséklet 21 ± 3 fok celziusz
- Helye: Gamf 9-es épület 1-es labor
- Nyúlás mérés típusa: keresztfej elmozdulással
- Vizsgálati sebesség: 50 mm/perc
- Előterhelés: lassan 1 mm/perc 2N -ig



23. Ábra: Instron 3366-os mérőgép

A méréseket Hansághi Pál tanár úr segítségével és felügyeletével végeztem el az alábbi sorrendet követve [10]:

1. a keresztfej alaphelyzetbe állítása
2. munkadarab befogása
3. előterhelés ráadása
4. értékek 0-ázása
5. teszt elindítása
6. teszt lefolyását követően minta kifogása
7. keresztfej alaphelyzetbe mozgatása
8. adatok mentése
9. új mérés indítása



**24. Ábra: munkadarab befogó készülékek,
befogott mintával**

A tesztet meghatározó paraméterek az alábbiak voltak:

- sebesség 1.: 1mm/ perc
- sebesség 2.: 50mm/ perc
- sebességek közti váltás: 0,3%-os megnyúlást követően
- mintavételezési tartomány: 100msec
- mérési tartomány: 100 mm
- befogási hossz 100mm

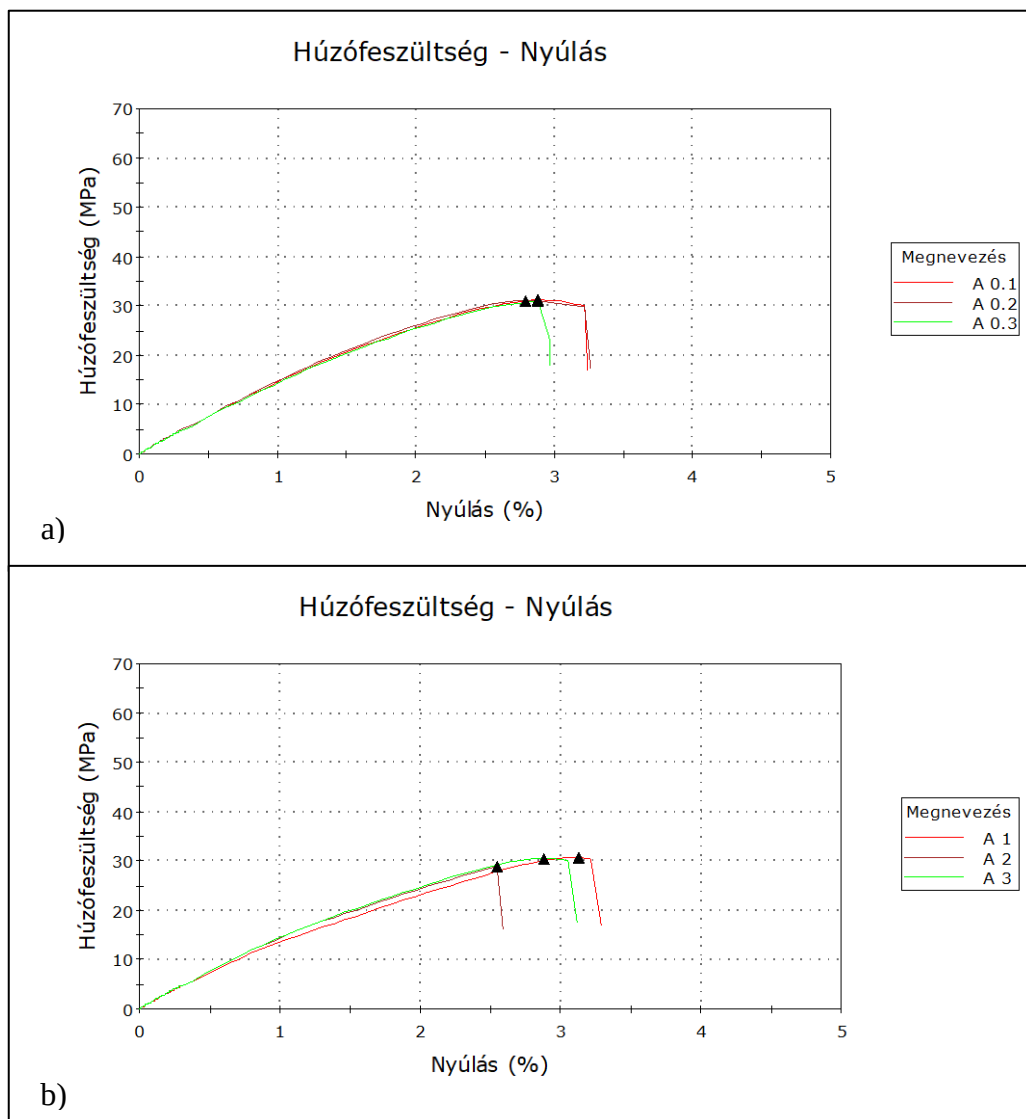
A teszt folyamán létrejövő görbéket és számadatokat lementettük, illetve kiemeltük a modulus és a szakadási pontokat.

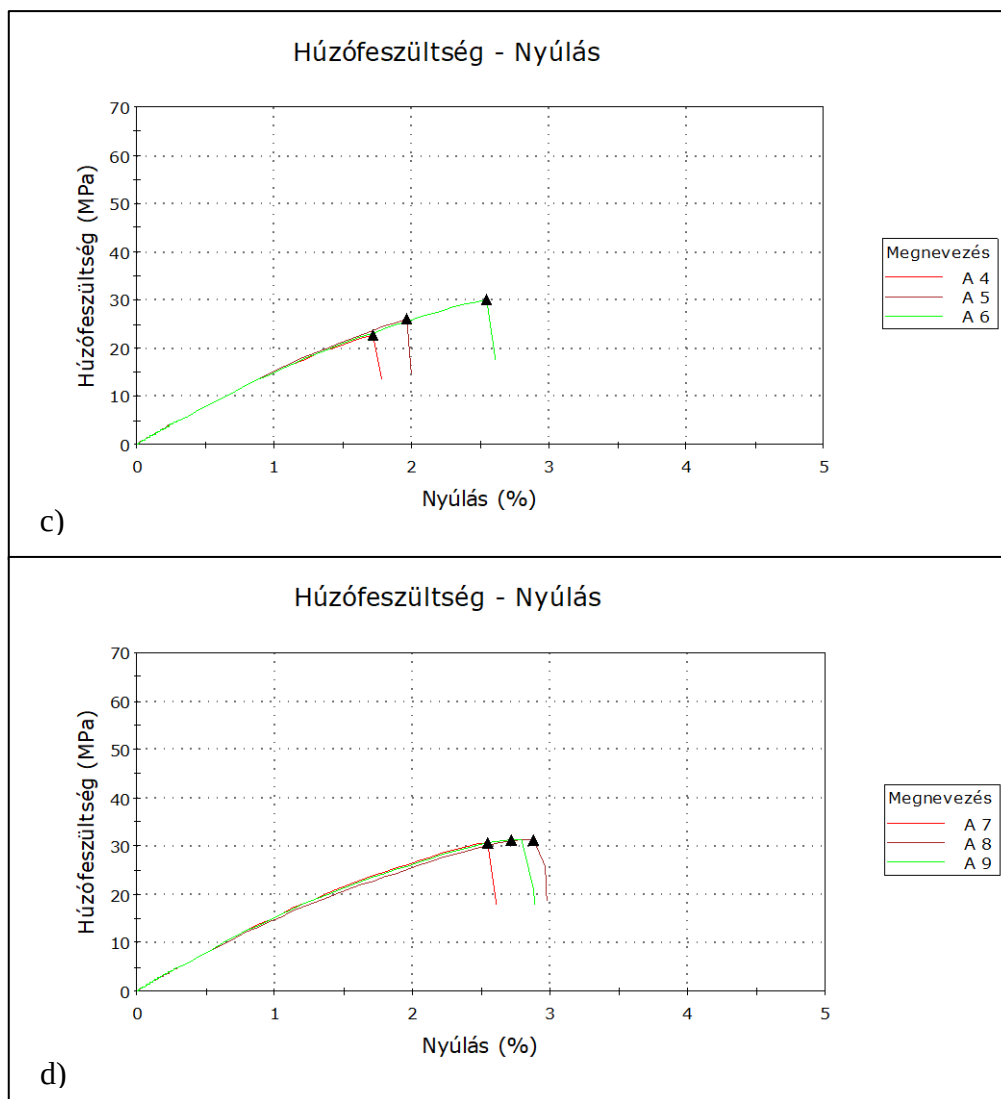
4.3. Az eredmények kiértékelése

Az eredmények kiértékeléséhez Microsoft Excel programot használtam, az átláthatóság elősegítése érdekében, és az adatok jó kezelhetővé tételéért.

Az adatokat a nyomtatványok fajtájuk és az azokon végrehajtott fárasztó ciklusok száma szerint csoportosítottam és így az alábbi jól elkülönített diagrammokat hoztam létre a mérőeszköz programjával.

Az „A” minták szakító görbéje az alábbi 25-ös ábrán látható diagrammokon figyelhető meg az igénybevételmentestől haladva a 100.000 ciklusúig:





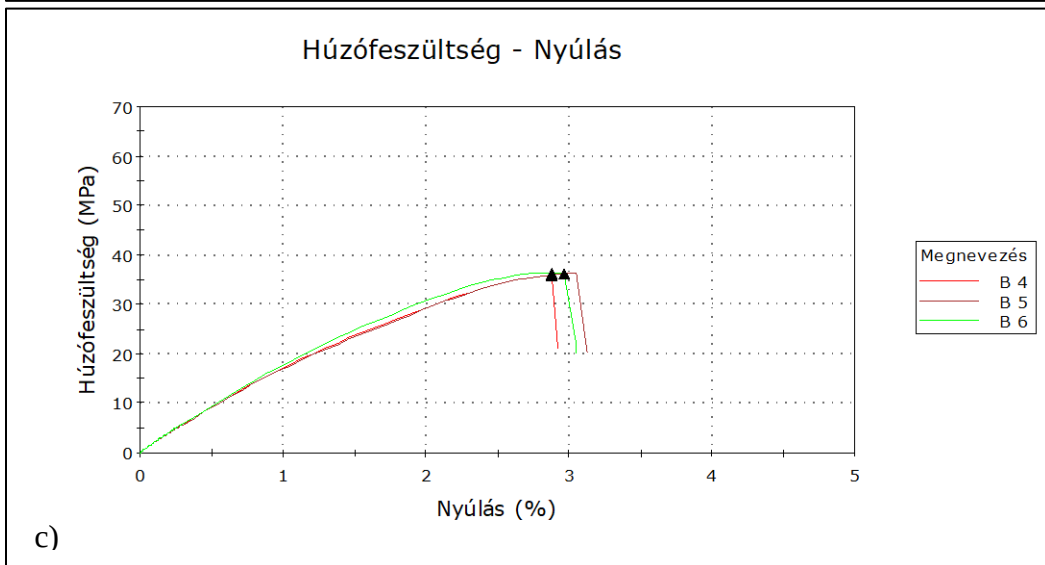
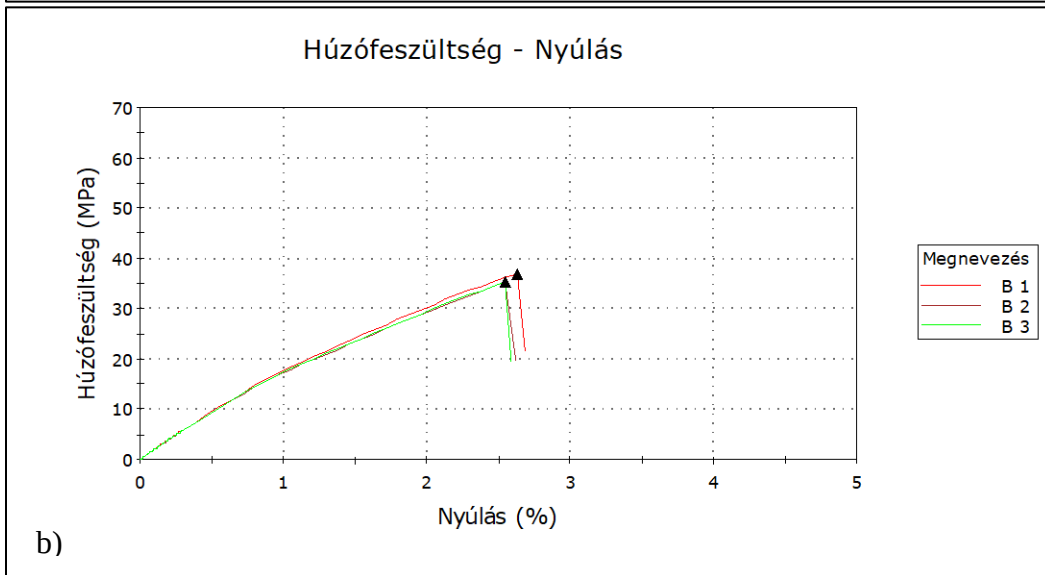
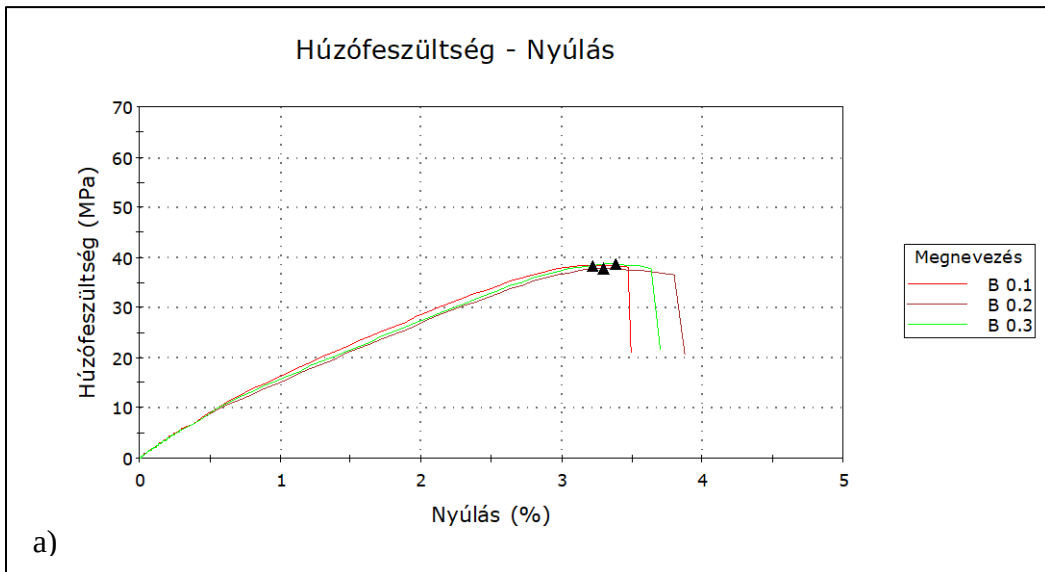
25. Ábra: Az „A” típusú minták igénybevételmentes darabjainak húzófeszültség-nyúlás diagrammja. a) Nyers minták, b) 1000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, c) 10.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, d) 100.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták

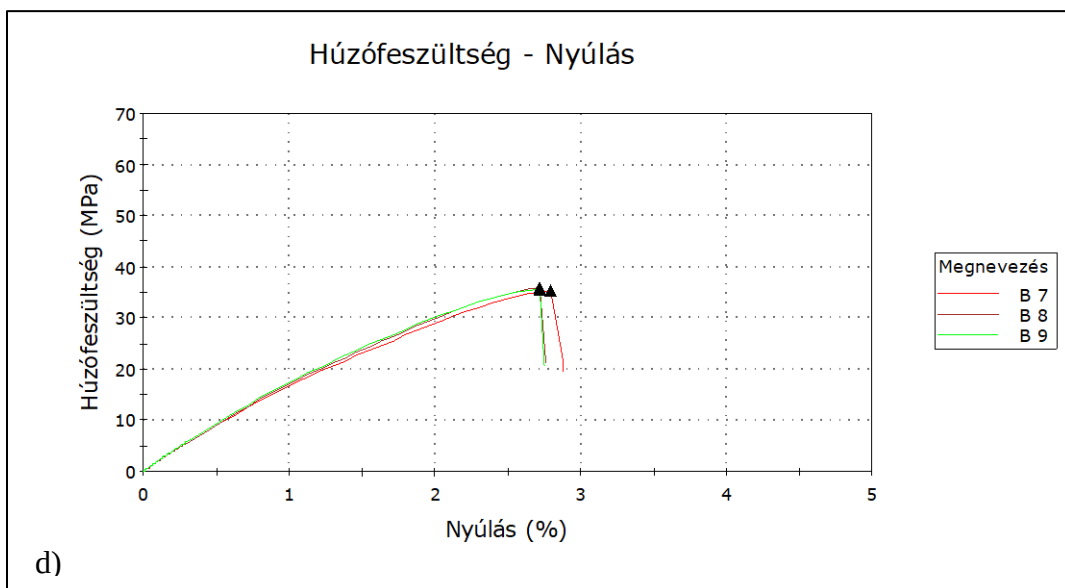
A diagrammok kiértékelése a mért modulusz, szakítószilárdság, szakadási nyúlás, maximális erő szerinti átlagos értéke, szórása és relatív szórása szerint került kiértékelésre. Ezen adatok segítségével vehetők össze a különböző típusú nyomtatványok értékei, és ezek által vonható le konklúzió, hogy melyik gyártmány fajta a legalkalmasabb hajlítási igénybevételnek kitett terhelések esetén alkalmazott alkatrész felépítésnek.

3. táblázat: Az „A” minták mért értékei

"A" Minták	Modulus	Szakítószilárdság	Szakadásnyúlás	Maximum Erő
0 ciklus	(MPa)	(MPa)	(%)	(N)
Átlag	1550	31,01	2,85	1241
<i>Szórás</i>	23,4	0,140	0,046	5,7
<i>Relatív szórás [%]</i>	1,5	0,5	1,6	0,5
1000 ciklus után				
Átlag	1537	30,02	2,85	1201
<i>Szórás</i>	30,0	0,980	0,291	38,7
<i>Relatív szórás [%]</i>	2,0	3,3	10,2	3,2
10.000 ciklus után				
Átlag	1629	26,21	2,08	1049
<i>Szórás</i>	20,6	3,708	0,426	148,1
<i>Relatív szórás [%]</i>	1,3	14,1	20,5	14,1
100.000 ciklus után				
Átlag	1622	31,14	2,72	1246
<i>Szórás</i>	22,0	0,342	0,165	13,8
<i>Relatív szórás [%]</i>	1,4	1,1	6,1	1,1

Következőként a „B” minták szakító görbét láthatjuk az alábbi diagramokon az igénybevételmentestől haladva a 100.000 ciklusúig:



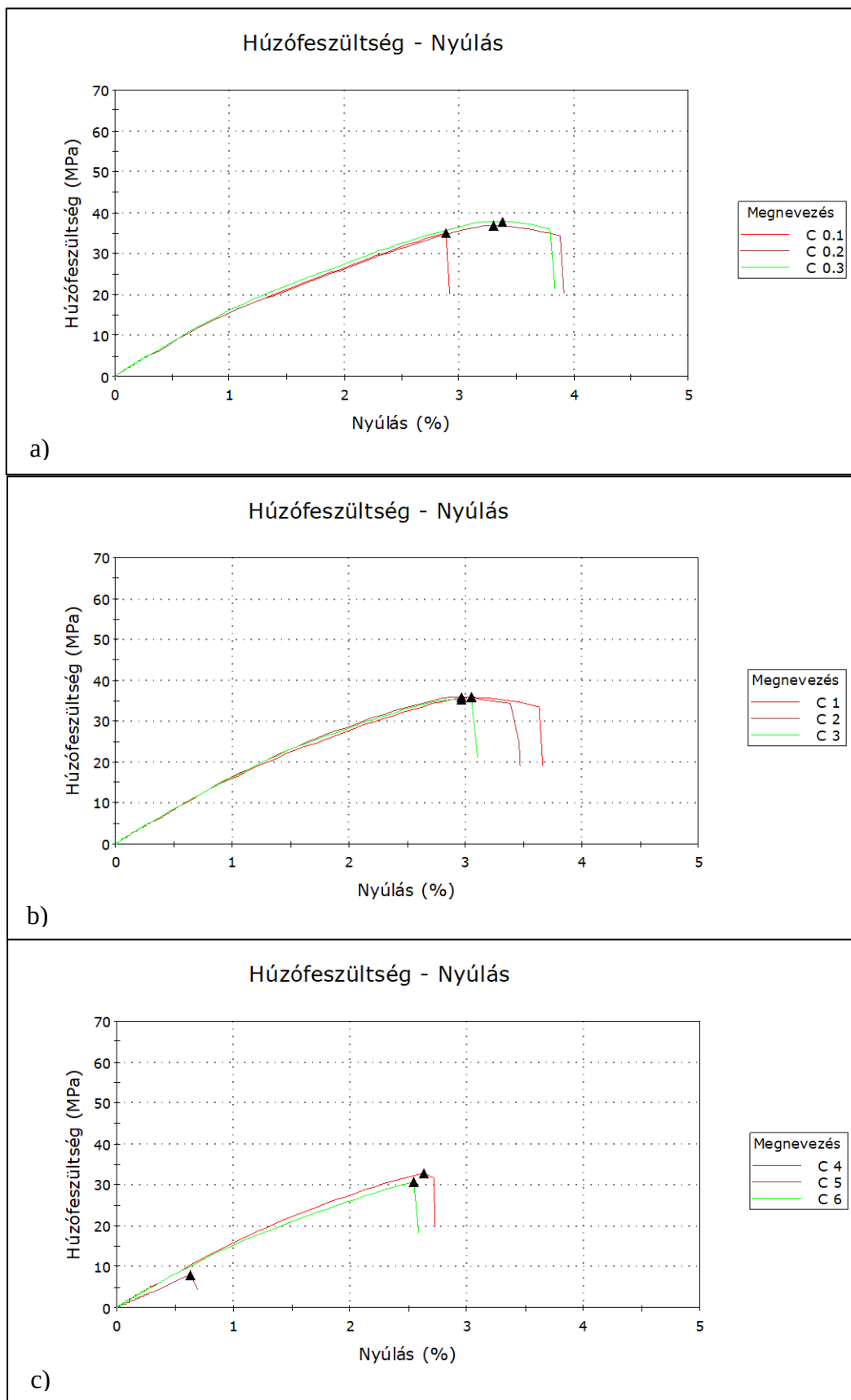


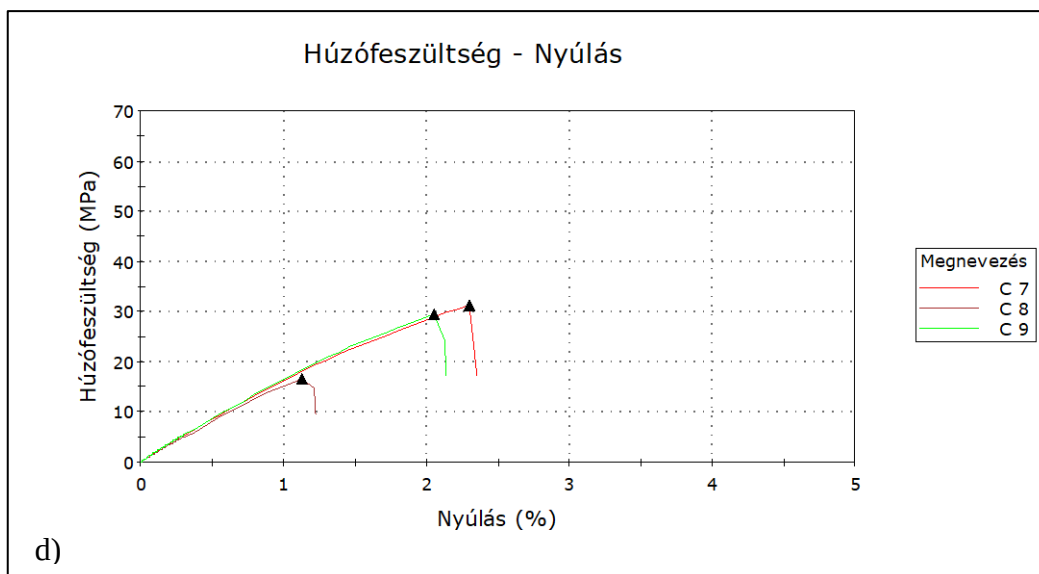
26. Ábra: Az „B” típusú minták igénybevételekmentes darabjainak húzófeszültség-nyúlás diagrammja. a) Nyers minták, b) 1000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, c) 10.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, d) 100.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták

4. táblázat: A „B” minták mért értékei

"B" Minták	Modulusz (MPa)	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadásnnyúlás (%)	Maximum Erő (N)
0 ciklus				
Átlag	1854	38,27	3,30	1531
<i>Szórás</i>	25,1	0,495	0,080	20,0
<i>Relatív szórás [%]</i>	1,4	1,3	2,4	1,3
1000 ciklus után				
Átlag	1914	35,73	2,58	1429
<i>Szórás</i>	17,4	0,906	0,046	36,1
<i>Relatív szórás [%]</i>	0,9	2,5	1,8	2,5
10.000 ciklus után				
Átlag	1877	36,12	2,91	1445
<i>Szórás</i>	28,9	0,256	0,052	10,1
<i>Relatív szórás [%]</i>	1,5	0,7	1,8	0,7
100.000 ciklus után				
Átlag	1867	35,66	2,75	1426
<i>Szórás</i>	39,2	0,325	0,046	12,7
<i>Relatív szórás [%]</i>	2,1	0,9	1,7	0,9

Ezt követően a „C” típusok eredménye az előzőek rendezése szerint:



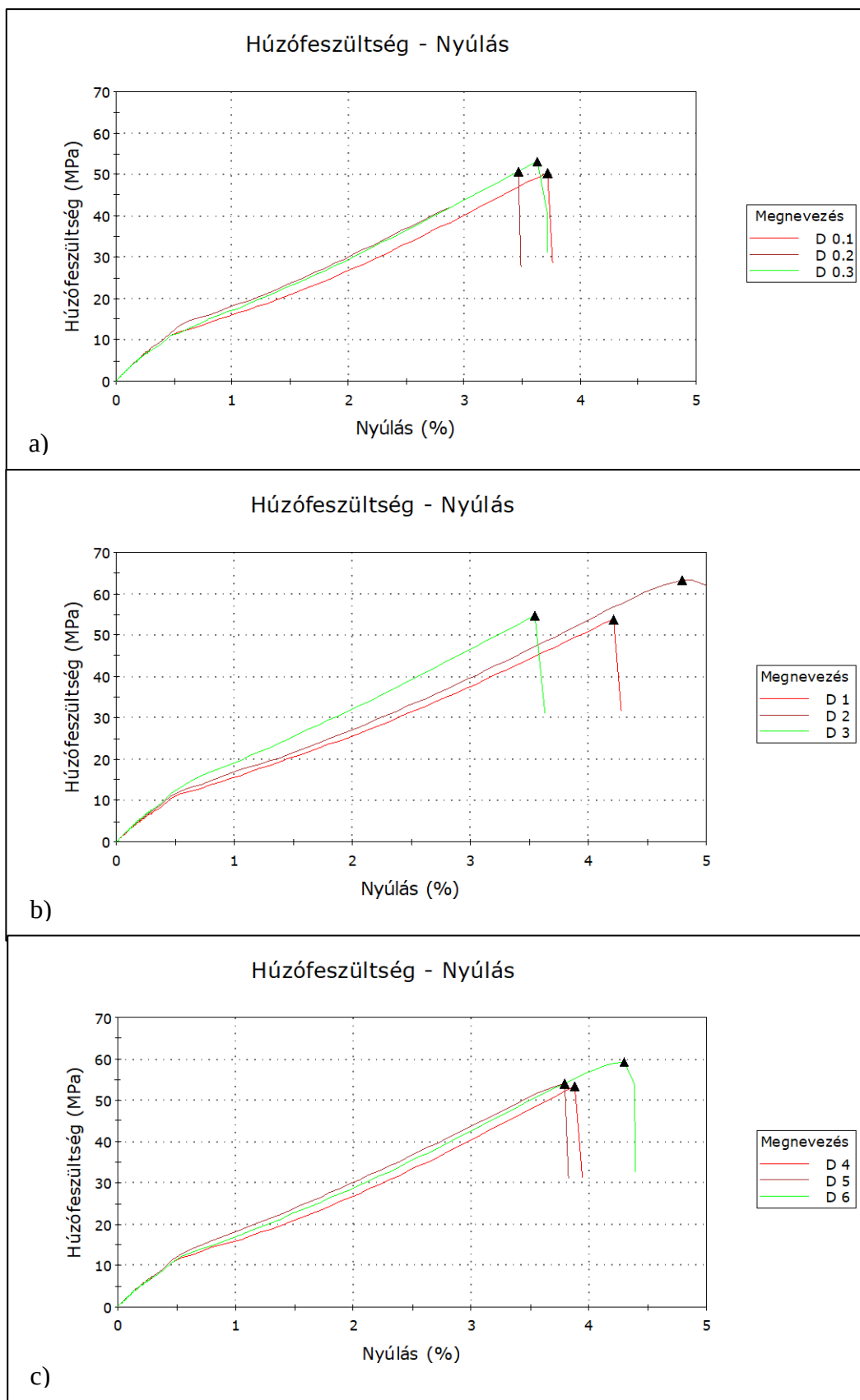


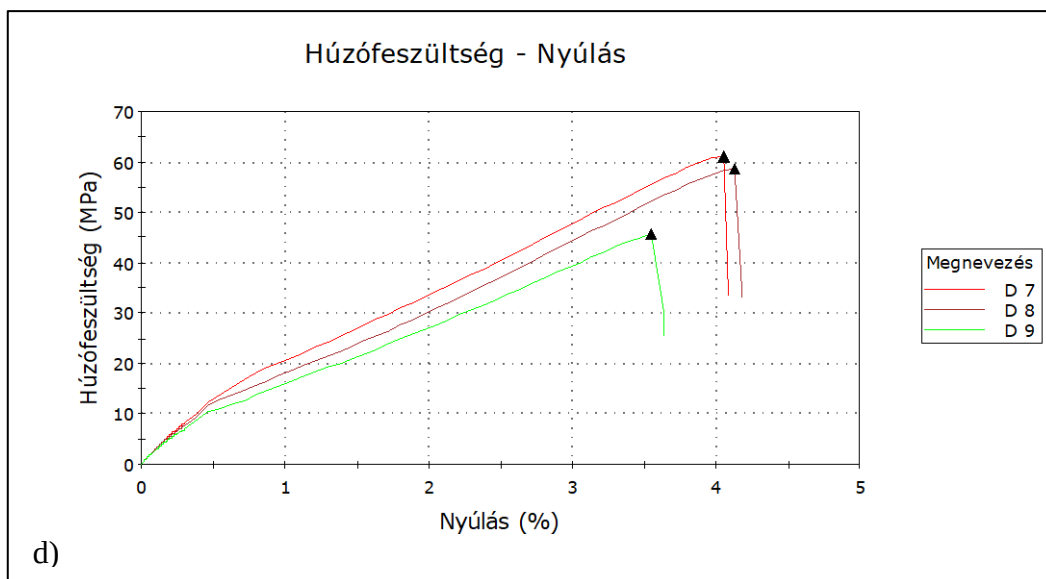
27. Ábra: Az „C” típusú minták igénybevételmentes darabjainak húzófeszültség- nyúlás diagrammja. a) Nyers minták, b) 1000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, c) 10.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, d) 100.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták

5. táblázat: A „C” minták mért értékei

"C" Minták	Modulusz (MPa)	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadásnyúlás (%)	Maximum Erő (N)
0 ciklus				
Átlag	1726	36,57	3,19	1463
Szórás	19,5	1,451	0,269	57,8
Relatív szórás [%]	1,1	4,0	8,4	4,0
1000 ciklus után				
Átlag	1731	35,73	3,00	1429
Szórás	16,3	0,273	0,046	10,6
Relatív szórás [%]	0,9	0,8	1,5	0,7
10.000 ciklus után				
Átlag	1558	23,92	1,94	957
Szórás	192,6	13,822	1,132	552,9
Relatív szórás [%]	12,4	57,8	58,5	57,8
100.000 ciklus után				
Átlag	1745	25,74	1,83	1029
Szórás	44,4	7,964	0,616	318,4
Relatív szórás [%]	2,5	30,9	33,7	30,9

Végezetül az utolsó „D” típusok eredményei szintén azonos sorrendben elhelyezve:





28. Ábra: Az „D” típusú minták igénybevételmentes darabjainak húzófeszültség- nyúlás diagrammja. a) Nyers minták, b) 1000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, c) 10.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, d) 100.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták

6. táblázat: A „D” minták mért értékei

"D" Minták	Modulus sz (MPa)	Szakítószilárd ság (MPa)	Szakadásnyúl ás (%)	Maximum Erő (N)
0 ciklus				
Átlag	2475	51,38	3,61	2055
Szórás	90,1	1,533	0,127	61,6
Relatív szórás [%]	3,6	3,0	3,5	3,0
1000 ciklus után				
Átlag	2365	57,22	4,19	2289
Szórás	163,0	5,181	0,626	206,7
Relatív szórás [%]	6,9	9,1	14,9	9,0
10.000 ciklus után				
Átlag	2325	55,53	3,99	2221
Szórás	85,4	3,125	0,269	124,7
Relatív szórás [%]	3,7	5,6	6,7	5,6
100.000 ciklus után				
Átlag	2432	55,18	3,91	2207
Szórás	230,9	8,316	0,314	332,2
Relatív szórás [%]	9,5	15,1	8,0	15,1

A kiértékelő táblázatok összevetése és kiértékelése:

7. táblázat: Összesített érték táblázat

"A" Minták	Modulusz	Szakítószilárdság	Szakadásinnyúlás	Maximum Erő	"B" Minták	Modulusz	Szakítószilárdság	Szakadásinnyúlás	Maximum Erő
0 ciklus	(MPa)	(MPa)	(%)	(N)	0 ciklus	(MPa)	(MPa)	(%)	(N)
Átlag	1550	31,01	2,85	1241	Átlag	1854	38,27	3,30	1531
Szórás	23,4	0,140	0,046	5,7	Szórás	25,1	0,495	0,080	20,0
Relatív szórás [%]	1,5	0,5	1,6	0,5	Relatív szórás [%]	1,4	1,3	2,4	1,3

1000 ciklus után					1000 ciklus után				
Átlag	1537	30,02	2,85	1201	Átlag	1914	35,73	2,58	1429
Szórás	30,0	0,980	0,291	38,7	Szórás	17,4	0,906	0,046	36,1
Relatív szórás [%]	2,0	3,3	10,2	3,2	Relatív szórás [%]	0,9	2,5	1,8	2,5

10.000 ciklus után					10.000 ciklus után				
Átlag	1629	26,21	2,08	1049	Átlag	1877	36,12	2,91	1445
Szórás	20,6	3,708	0,426	148,1	Szórás	28,9	0,256	0,052	10,1
Relatív szórás [%]	1,3	14,1	20,5	14,1	Relatív szórás [%]	1,5	0,7	1,8	0,7

100.000 ciklus után					100.000 ciklus után				
Átlag	1622	31,14	2,72	1246	Átlag	1867	35,66	2,75	1426
Szórás	22,0	0,342	0,165	13,8	Szórás	39,2	0,325	0,046	12,7
Relatív szórás [%]	1,4	1,1	6,1	1,1	Relatív szórás [%]	2,1	0,9	1,7	0,9

"C" Minták	Modulusz	Szakítószilárdság	Szakadásinnyúlás	Maximum Erő	"D" Minták	Modulusz	Szakítószilárdság	Szakadásinnyúlás	Maximum Erő
0 ciklus	(MPa)	(MPa)	(%)	(N)	0 ciklus	(MPa)	(MPa)	(%)	(N)
Átlag	1726	36,57	3,19	1463	Átlag	2475	51,38	3,61	2055
Szórás	19,5	1,451	0,269	57,8	Szórás	80,1	1,533	0,127	61,6
Relatív szórás [%]	1,1	4,0	8,4	4,0	Relatív szórás [%]	3,6	3,0	3,5	3,0

1000 ciklus után					1000 ciklus után				
Átlag	1731	35,73	3,00	1429	Átlag	2365	57,22	4,19	2289
Szórás	16,3	0,273	0,046	10,6	Szórás	163,0	5,181	0,626	206,7
Relatív szórás [%]	0,9	0,8	1,5	0,7	Relatív szórás [%]	6,9	9,1	14,9	9,0

10.000 ciklus után					10.000 ciklus után				
Átlag	1558	23,92	1,94	957	Átlag	2325	55,53	3,99	2221
Szórás	192,6	13,822	1,132	552,9	Szórás	85,4	3,125	0,269	124,7
Relatív szórás [%]	12,4	57,8	58,5	57,8	Relatív szórás [%]	3,7	5,6	6,7	5,6

100.000 ciklus után					100.000 ciklus után				
Átlag	1745	25,74	1,83	1029	Átlag	2432	55,18	3,91	2207
Szórás	44,4	2,964	0,616	318,4	Szórás	230,9	3,316	0,314	332,2
Relatív szórás [%]	2,5	30,9	33,7	30,9	Relatív szórás [%]	9,5	15,1	8,0	15,1

A táblázatokban pirossal jelölt értékek a kimagaslóan rossz, illetve degradálódott értékek melyek a típusra jellemző tönkremeneteli veszélyforrások jelei.

A kiértékelés fő szempontja, hogy az értékek a lehető legközelebb álljanak a kiinduló (nulla ciklusos) állapothoz.

Számszerűsített kritériumok átlagértékek esetén:

- Maximális erő eltérése: kevesebb mint 10%
- Szakadási nyúlás eltérése: kevesebb mint 30%
- Szakítószilárdság eltérése: kevesebb mint 10%
- Modulusz eltérése: kevesebb mint 10%

Kritériumok szórás esetén:

- Maximális erő eltérése: kevesebb mint a kiinduló adat értéke
- Szakadási nyúlás eltérése: kevesebb mint a kiinduló érték fele
- Szakítószilárdság eltérése: kevesebb mint a kiinduló érték 2-szerese
- Modulusz eltérése: kevesebb mint a kiinduló érték 2-szerese

Kritériumok relatív szórás esetén:

- Maximális erő eltérése: kevesebb mint a kiinduló érték 4-szerese
- Szakadási nyúlás eltérése: kevesebb mint a kiinduló érték 2-szerese
- Szakítószilárdság eltérése: kevesebb mint a kiinduló érték 4-szerese
- Modulusz eltérése: kevesebb mint a kiinduló érték 2-szerese

Azon mintadarabok, amelyek a fenti kitételeket teljesítik, vagy a legkevesebb kimagasló értékkel rendelkeznek, teljesítik számunkra a kívánt eredményt, így megfelelőnek minősíthetővé válnak.

Az „A” típusú minták kiértékelése a táblázat adatai és a kritériumok alapján az alábbi:

8. táblázat: Az „A” minták megfelelőségének értékelése

"A" minták Átlag érték eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	-3,22%	-15,47%	0,40%
Szakadási nyúlás	0%	-27,02%	-4,56%
Szakító szilárdság	-0,03%	-12,66%	3,77%
Modulusz	-0,83%	5,10%	4,65%
Megfelelt:	Igen	Nem	Igen
"A" minták Szórás eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	578,95%	2498,25%	142,11%
Szakadási nyúlás	532,61%	826,09%	258,70%
Szakító szilárdság	600,00%	2548,57%	144,29%
Modulusz	28,21%	11,97%	5,98%
Megfelelt:	Nem	Nem	Nem
"A" minták Relatív szórás eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	540,00%	2720,00%	120,00%
Szakadási nyúlás	537,50%	1181,25%	281,25%
Szakító szilárdság	560,00%	2720,00%	120,00%
Modulusz	33,33%	13,33%	6,67%
Megfelelt:	Nem	Nem	Nem

A táblázatban szereplő adatokból kiolvasható, hogy az „A” mintasorozat a fárasztás során erősen degradálódott. A mintadarabok kiinduló tulajdonságai nagy mértékben csökkentek. Ezen információk alapján kijelenthető, hogy a sorozat kialakítása nem viseli el a hajlító igénybevételt.

Szerkezetekben, gépekben való alkalmazásuk nem javasolt!

A „B” típusú minták kiértékelése a táblázat adatai és a kritériumok alapján:

9. táblázat: A „B” minták megfelelőségének értékelése

"B" minták Átlag érték eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	-6,62%	-5,62%	-6,86%
Szakadási nyúlás	-21,82%	-11,82%	-16,67%
Szakító szilárdság	-6,64%	-5,62%	-6,82%
Modulusz	3,24%	1,24%	0,70%
Megfelelt:	Igen	Igen	Igen
"B" minták Szórás eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	80,50%	-49,50%	-36,50%
Szakadási nyúlás	-42,50%	-35,00%	-42,50%
Szakító szilárdság	83,03%	-48,28%	-34,34%
Modulusz	-30,68%	15,14%	56,18%
Megfelelt:	Igen	Igen	Igen
"B" minták Relatív szórás eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	92,31%	-46,15%	-30,77%
Szakadási nyúlás	-25,00%	-25,00%	-29,17%
Szakító szilárdság	92,30%	-46,15%	-30,77%
Modulusz	-35,71%	7,14%	50,00%
Megfelelt:	Igen	Igen	Igen

A „B” sorozat tulajdonságai a táblázat alapján csak kis mértékben csökkentek, és a teszt során támasztott elvárásokat teljesítik. Így a minták megfelelőnek minősíthetők.

Ezen konstrukció használata javallott felhasználásra mind szerkezeti, mind gépelemként!

A „C” típusú minták kiértékelése a táblázat adatai és a kritériumok alapján:

10. táblázat: A „C” minták megfelelőségének értékelése

"C" minták Átlag érték eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	-2,30%	-34,59%	-29,67%
Szakadási nyúlás	-5,96%	-39,18%	-42,63%
Szakító szilárdság	-2,29%	-34,59%	-29,61%
Modulusz	0,29%	-9,73%	1,10%
Megfelelt:	Igen	Nem	Nem
"C" minták Szórás eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	-81,66%	856,57%	450,87%
Szakadási nyúlás	-82,90%	320,82%	129,00%
Szakító szilárdság	-81,19%	852,58%	448,86%
Modulusz	-16,41%	887,69%	127,69%
Megfelelt:	Nem	Nem	Nem
"C" minták Relatív szórás eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	-82,50%	1345,00%	672,50%
Szakadási nyúlás	-82,14%	596,43%	301,19%
Szakító szilárdság	-80,00%	1345,00%	672,50%
Modulusz	-18,18%	1027,27%	127,27%
Megfelelt:	Igen	Nem	Nem

A „C” típusú mintái kis ciklusnál közelíti a kritériumok teljesítését, de hosszabb távú igénybevétel esetén a tönkremenetel esélye növekszik. Erre a következtetésre a szórás nagymértékű növekedése mutat, amely kritikusan nagy esélyt ad, hogy az esetleges szerkezeti elemek, amelyek ezzel a konstrukcióval készülnek, nagy mértékű selejt termelést fognak okozni, vagy a vártnál hamarabbi meghibásodást, tönkremenetelt. Ezen minták tönkremenetele nem megbízható, véletlenszerű jelleget mutatott a teszt során.

A „C” minták felhasználása erősen ellenjavallott!

A „D” típusú minták kiértékelése a táblázat adatai és a kritériumok alapján:

11. táblázat: A „D” minták megfelelőségének értékelése

"D" minták Átlag érték eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	11,39%	8,08%	7,40%
Szakadási nyúlás	16,07%	10,53%	8,31%
Szakító szilárdság	11,37%	8,07%	7,39%
Modulusz	-4,44%	-6,06%	-1,74%
Megfelelt:	Nem	Nem	Igen
"D" minták Szórás eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	235,55%	102,44%	439,29%
Szakadási nyúlás	392,91%	111,81%	147,24%
Szakító szilárdság	237,96%	103,85%	442,47%
Modulusz	80,91%	-5,22%	156,27%
Megfelelt:	Nem	Nem	Nem
"D" minták Relatív szórás eltérése	Ciklus után		
	1.000	10.000	100.000
Maximális szakítási erő:	200,00%	86,67%	403,33%
Szakadási nyúlás	325,71%	91,43%	128,57%
Szakító szilárdság	203,33%	86,67%	403,33%
Modulusz	91,67%	2,78%	163,89%
Megfelelt:	Nem	Igen	Nem

A „D” verzió arra enged következtetni, hogy a tömör minták a fárasztás során, a belső súrlódásból fakadóan rácsszerkezet átalakuláson mentek át. A kezdeti mintákhoz képest, minél több cikluson ment keresztül egy adott minta, annál jobbak lettek azon darab átlagos szakítási-, nyúlási- stb. értékei. Viszont a mérések alapján ezen jelenség nem egységesen zajlott a minták között, így nagy szórás alakult ki. A teszt alatt támasztott kritériumokat nem, illetve nem várt módon felelt meg. Míg a táblázatos kiértékelés nem fogadja el használható kivitelként, tapasztalati módon kijelenthető, hogy a fárasztásra (a tesztelés határain belül) progresszív módon reagált ezzel önmagát erősítve, így szerkezeti elemként lehetővé téve a felhasználást.

A „D” minták, az anyag és idő felhasználás tekintetében nem ajánlottak, de feladatukat képesek ellátni alacsony hőterhelés esetén szerkezeti elemként.

5. Technológiai ajánlás az additív eljáráshoz, a kifáradási határok ismeretében

Az elvégzett mérések és az általuk kapott értékek alapján kijelenthető, hogy a próbaminták közül egy minta felelt meg az elvárásoknak, továbbá egy elfogatható tulajdonságokkal rendelkező próbadarab sorozatról érdemes még szót ejteni.

A „B” típusú minták, azaz a „B_szd2_0.2_200C_w2_tb4_tbp-lines_f60-cubic” sorozat darabjai minősíthetők megfeleltnek és gyártásra ajánlottak. A „D_szd2_0.2_200C_w999_tb999_tbp-concentric_f100-concentric” sorozat a kritériumoknak nem felelt meg, de a kiértékelés gondos vizsgálatával megerősíthető, hogy felhasználásra alkalmas, de gyártási szempontból nagyon nagy a hátránya az ajánlott típussal szemben, amely az anyag és idő felhasználásból adódik. Illetve nagyon nagy a tönkremeneteli szórás, amely bizonytalanak jelöli az anyagot, még akkor is ha a tönkremenetek a kiinduló érték felett történtek.

Így az ajánlott technológiai eljárás a következő:

1. Bármely esetben, az általunk használt nyomtató tulajdonságait megismerni elsajátítani.
2. Az adott nyomtatóhoz ajánlott, vagy általunk választott, a gépezettel kompatibilis filament tulajdonságainak, gyártói ajánlásainak megfelelő anyaghasználat elsajátítása.
3. A választott polimer nyomtatási beállításához tájékozódjunk annak gyártójának ajánlásairól, melyet vezérelvként követve, az adott nyomtatóra jellemző sajátosságok eltéréseivel kalkulálva használjunk fel (Pl.: Hőfok beállítás, alul / túl extrudálás).
4. A 3D nyomtatóhoz használt slicer program segítségével állítsuk be a kalkulált, vagy új alapanyag esetén a leírások alapján jónak vélt adatokat, nyomtatási paramétereket, a gép tulajdonságainak maximuma és a készülő tárgy alak- és méret helyességének szükségletének megfelelő nyomtatássebességet.

5. A programban használjuk a „B_szd2_0.2_200C_w2_tb4_tbp-lines_f60-cubic” sorozat tulajdonságaival megegyező beállításokat, amik az alábbiak:
- a. „B”: Típus könnyített megkülönböztető neve
 - b. „szd2”: Próbaállítási szám
 - c. „0.2”: Rétegvastagság mm-ben: 0,2 mm
 - d. „200C”: Nyomtató fej hőmérséklete: 200°C (Erről az értékről a felhasznált anyag döntsön ne a mintában szereplő adathoz ragaszkodjunk!)
 - e. „w2”: Munkadarabot határoló falak és számuk: 2 db
 - f. „tb4”: A minta aljának és tetejének rétegszáma: 4 db
 - g. „tbp-lines”: Az alsó és felső rétegek kitöltésének útja (csíkok oda vissza 45 fokban az alsó falhoz képest és keresztben az alatta lévő réteghez képest)
 - h. „f60-cubic”: A test kitöltöttsége 60%-os és a kitöltés alakja „cubic” elnevezésű
6. Exportáljuk a programot külső adathordozóra, vagy egyből a nyomtatóra, ügyelve a kompatibilis programnyelv használatra.
7. Lehetőség szerint használjunk zárt, pormentes nyomtatótérrel rendelkező nyomtatót.
8. A nyomtatót tartsuk megfigyelés alatt munka közben, akár személyesen, vagy távvezérléssel, hogy hiba esetén közbe tudjunk avatkozni, leállítani a gépet az anyagkárok minimalizálása érdekében.
9. Várjuk meg amíg a kész munkadarab teljesen lehűl, csak ezután távolítsuk el a gépből.
10. Vizsgáljuk meg szemrevételezéssel az elkészült munkadarabot, törés, repedés, anyaghiány, vagy megfolyásból fakadó torziók megállapítása érdekében.
11. Ha a szemrevételezésnek megfelelt, a munkadarabot felhasználhatjuk, vagy az általunk kívánt további teszteknek alávetethetjük.

6. Összegzés

A Szakdolgozat írása folyamán, arra kerestünk megoldást, hogy FDM nyomtatással készült alkatrészeket megbízhatóan, ellenőrizhető és biztosítható minőségben lehessen létrehozni, melyet utána felhasználhassunk szerkezetekben, gyártmányok részeként.

A kutatás folyamán megismerkedtem egy egyedi fűrésztő berendezés működésével és használatával, majd rekonstruáltam a szerkezetet digitálisan, a későbbi virtuális fűrésztások elvégezhetősége érdekében. Ehhez szükség volt a gépezet szétszerelésére a jobb, pontosabb mérések érdekében, majd a kézi mérőeszközökkel és berendezésekkel adatok alapján elkészítettem a 3D-s modelljét. Ezen berendezés összeállítása a szakdolgozat íródását követő további jövőbeni kutatások alapját hivatott képezni.

A gépezet digitalizálását követően összeállítottam a berendezést az általam használni kívánt áttételekkel az osztótárcsán. Ezt követően szabványos minta anyagokat hoztam létre melyek felhasználhatók ezen fűrésztő-berendezésben. A mintákat virtuálisan készítettem, majd egy FDM technológián alapuló 3D nyomtatóval készítettem el 4 különböző próba darab sorozatot. Mindegyik sorozat azonos ciklusokon esett át, egy fűrésztáson, majd ezt követő szakító vizsgálaton. Természetesen az alap adatokat adó példányok 0 ciklust voltak fűrésztva.

A szakítóvizsgálat eredményiből kiolvasható volt, hogy csak 2 minta sorozat állja meg a helyét műszaki felhasználásnál, és ebből is csak egy, a „B_szd2_0.2_200C_w2_tb4_tbp-lines_f60-cubic” sorozat próbadarabjai produkáltak jól követhető és számítható adatokat, illetve a követelményeket melyeket felállítottam csak ezen darabok teljesítették. Ezt követően ajánlást készítettem ezen mintadarabok adatait felhasználva, amely iránymutatást nyújt a szerkezeti anyagként felhasználható FDM termékek kapcsán. Fontos kihangsúlyozni, hogy a tesztelés időtartama, és tisztasági körülményei nem adtak okot a PLA lebomlását okozó viszonyok figyelembevételére a kutatás folyamán. Tehát hosszabb idejű és szennyezett körülmények melletti használat esetén ajánlott más alapanyagból készíteni a terméket, de a gyártási ajánlás pontjai azon más anyagokra is használhatóak!

7. Summary

During the writing of the thesis, we were looking for a solution to create FDM printed parts in reliable, controllable, and assurable quality, which can then be used in structures and as part of products.

During the research, I got acquainted with the operation and use of a unique tiring device, then I reconstructed the structure digitally to perform later virtual fatigues. For this, it was necessary to disassemble the machine for better, more accurate measurements, and then I created a 3D model based on data with handheld measuring devices and equipment. The compilation of this device is intended to form the basis for further future research after the thesis is written.

After digitizing the machinery, I assembled the equipment with the ratios I wanted to use on the distribution disc. Subsequently, I created standard sample materials that can be used in this tiring equipment. The samples were made virtually, then I made 4 different series of test pieces with a 3D printer based on FDM technology. Each series underwent identical cycles, a tiring and subsequent tensile test. Of course, the instances providing basic data were tired of 0 cycles.

It was clear from the results of the tensile test that only 2 sample series were suitable for technical use, and only one of them, the test pieces of the "B_szd2_0.2_200C_w2_tb4_tbp-lines_f60-cubic" series, produced easily traceable and calculable data, and the requirements I set were met only by these pieces. Subsequently, I prepared a recommendation using the data from these samples, which provides guidance on FDM products that can be used as structural materials. It is important to emphasize that the duration of the testing and the purity conditions did not give reason to consider the conditions causing the degradation of PLA during the research. So, in case of prolonged use under contaminated conditions, it is recommended to make the product from other raw materials, but the points of the manufacturing recommendation can also be used for those other materials too!

8. Függelék

- [1] All3DP, Anatol Locker, Top 20: Best 3D Printer Slicer Software (Most Are Free), 2023
<https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>,
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16
- [2] Boppana V. Chowdary and Aaron Alleyne Bob, Impact of processing parameters on fatigue life of fused filament fabricated parts: application of central composite design and genetic algorithm tools, 2021
<https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJRAPIDM.2021.120016>
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [3] Budapesti Műszaki És Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék, Polimerek hajlító vizsgálata, Változat: 1.3, 2014
http://www.pt.bme.hu/segedletek/a2_hajlitas_v13.pdf,
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [4] Budapesti Műszaki És Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék, Polimerek Szakítóvizsgálata, Változat: 4.0 2015. február 12.
http://www.pt.bme.hu/segedletek/a1_szakitas_v4.pdf, Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16
- [5] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000
- [6] EN ISO 178:2001 szabvány: Plastics- Determination of flexural properties (2001)
- [7] Fatigue experimental analysis and modelling of fused filament fabricated PLA specimens with variable process parameters, Cerda-Avila, Steffany N.;Medellín-Castillo, Hugo Iván;Cervántes-Uc, José M.; ...More, Rapid prototyping journal, 02 Jun 2023, Vol. 29, Issue 6, pages 1155 – 1165
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-10-2022-0354/full/html>
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [8] Gradus Vol 2, No 2 (2015) 124-128 ISSN 2064-8014, Fodor Antal, Dr. Boza Pál, 2015

- http://real.mtak.hu/110528/1/2015_2_ENG_003_Fodor.pdf,
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [9] Gradus Vol 5, No 1 (2018) 107-112 ISSN 2064-8014, Fodor Antal, DMA vizsgálat 3D nyomtatott próbatestek fárasztó vizsgálatához, 2018
http://real.mtak.hu/109728/1/2018_1_ENG_002_Fodor.pdf,
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [10] Gomez-Gras, G., Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J. A., & Lluma-Fuentes, J. (2018). Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. *Materials & Design*, 140, 278-285.
- [11] Hütte: A mérnöki tudományok kézikönyve, Springer-Verlag, 1993
- [12] Marino Brčić, Sanjin Krščanski and Josip Brnić, Rotating Bending Fatigue Analysis of Printed Specimens from Assorted Polymer Materials, 2021,
<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/7/1020>
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [13] Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar, Kerámia- és Polimermérnöki Intézet Polimermérnöki Intézeti Tanszék, Molnár Marcell Ferenc, Alkatrész előállítás lehetősége fdm 3D nyomtatással
<http://midra.uni-miskolc.hu/document/37766/34823.pdf>,
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [14] Mohammad Sadegh Aghareb Parast, Abbasali Bagheri, Abdolvahed Kami, Mohammad Azadi & Vahid Asghari, Bending fatigue behavior of fused filament fabrication 3D-printed ABS and PLA joints with rotary friction welding, 2022
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-022-00307-5>
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [15] MSZ EN ISO 527:2012 szabvány: Szakítóvizsgálat
- [16] ScienceDirect, Yuri Estrin, Alexei Vinogradov, *International Journal of Fatigue* Volume 32, Issue 6, June 2010, Pages 898-907, Fatigue behaviour of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview, 2009

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112309002102>,

Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.

- [17] Soran Hassanifard, Seyed M. Hashemi, On the strain-life fatigue parameters of additive manufactured plastic materials through fused filament fabrication process, Additive Manufacturing Volume 32, March 2020, 100973
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860419303495>
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [18] Sulinet, Educatio Társadalmi Szolgáltató Nonprofit Kft, Hajlító igénybevétel, 20xx, <https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/gepeszet/mechanika/hajlito-igenybevetel/semleges-szal>, Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [19] Széchenyi István Egyetem, Polimerek vizsgálatai, DR Hargitai Hajnalka, http://www.sze.hu/~hargitai/2014%20Mernoki%20Anyagok_Jarmuszerkezeti%20Anyagok/16%20ea%202014%2004%2009.pdf, Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [20] XV. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Sebők Gergely, Célgép tervezése műanyagok fárasztó vizsgálatához, 2010, CNC Media, Robin, Dongguan Roche Industrial, Minden, amit a 3D-nyomtatásról tudni kell
<https://www.cnc.hu/2020/05/minden-amit-a-3d-nyomtatasirol-tudni-kell/>,
Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16
- [21] XVI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Sebők Gergely, Fodor Antal, Polimerek Fárasztó Vizsgálata Ciklikus Igénybevétellel, 2011
<https://api.eda.eme.ro/server/api/core/bitstreams/fac6b9ec-172f-4a61-8090-c5c3fae0b3f4/content>, Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.
- [22] XVI. Fiatal műszakiak tudományos ülészaka, járműipari műanyag hulladékok újrahasznosításának lehetőségei, Kapitány Norbert, Szűcs András, Ádám Balázs, 2011
<https://api.eda.eme.ro/server/api/core/bitstreams/cab7dd9a-fcf0-4bf0-b98c-d584717e7689/content>, Megtekintés dátuma: 2023. 11. 16.

Ábrajegyzék

1. Ábra: Polimerek szakítógörbéi. a) rideg (üvegszerű) viselkedés, b) és c) nyakképződést mutató viselkedés d) lágy, gumiszerű viselkedés nagy (>50%) szakadási nyúlással [3].....	7
2. Ábra: Szerkezeti acélok Wöhler-görbéje [15]	8
3. Ábra: A szálak kötődése egymáshoz 3D nyomtatás során: (1) érintkezés, (2) nyak képződés, (3) diffúzió [9]	10
4. ábra: A Neumann János Egyetemén található polimer fűrésztő berendezés	11
5. Ábra Próbatest típusok: (a) hőre lágyuló polimer anyagokhoz, (b) kompozit szakító próbatest [13].....	12
6. Ábra: A semleges szál sematikus ábrázolása méretekkel, hajlításnak kitett fémek esetében. [12].....	12
7. Ábra: A főtengelyeket tartó szerkezet elhelyezkedése.	14
8. Ábra: A kiserelt alkatrészek elhelyezése, tárolása.....	14
9. Ábra: Az alaplemez és a mozgatókarok kezdeti összeállítása a programfelület megjelenítésével együtt.	17
10. Ábra: A mozgó karok és annak tengelyének csapágyazása a rögzítő házban.	18
11. Ábra: Az összeállított mozgókar mechanizmus, mozgatórúd nélkül, modellfa részlettel a baloldalon.	18
12. Ábra: az osztótárcsa és a mozgató rúd bekötése, csapágyazása	19
13. Ábra: A főtengelyek csapágyazása, és elhelyezkedése az állványon.....	19
14. Ábra: Az elektromotor elhelyezkedése a szerkezet alatt.	20
15. Ábra: A fűrésztő gépezet elkészült 3D-s modellje	20
16. Ábra: Rajzolt próbatest háromdimenziós méretei	23
17. Ábra: A slicer software programtervezet nézeti módjában látható nyomtatandó munkadarabok.	24
18. Ábra: A vizsgált minták elkészítéséhez használt, Creality Ender 5 nyomtató	25
19. Ábra: A mérés szempontjából elhanyagolható hibákkal rendelkező mintadarabok.....	27
20. Ábra: Előtesztelésre szánt selejtes mintadarabok.....	28
21. Ábra: Fűrésztés közben eltört előtesztelő minták.....	29
22. Ábra: Fűrésztésen átesett munkadarabok. A felületeken látható feketés foltok a befogó által okozott koszolódás.	30
23. Ábra: Instron 3366-os mérőgép.....	30
24. Ábra: munkadarab befogó készülékek, befogott mintával	31
25. Ábra: Az „A” típusú minták igénybevételmentes darabjainak húzófeszültség- nyúlás diagrammja. a) Nyers minták, b) 1000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, c) 10.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, d) 100.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták.....	33
26. Ábra: Az „B” típusú minták igénybevételmentes darabjainak húzófeszültség- nyúlás diagrammja. a) Nyers minták, b) 1000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, c) 10.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, d) 100.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták.....	36
27. Ábra: Az „C” típusú minták igénybevételmentes darabjainak húzófeszültség- nyúlás diagrammja. a) Nyers minták, b) 1000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, c) 10.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, d) 100.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták.....	38
.....	39
28. Ábra: Az „D” típusú minták igénybevételmentes darabjainak húzófeszültség- nyúlás diagrammja. a) Nyers minták, b) 1000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, c) 10.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták, d) 100.000 ciklusú hajlító igénybevételnek kitett minták.....	40

Táblázat jegyzék:

1. táblázat: A Méretek megállapításának lehetséges eljárásai	15
2. táblázat: A 3D-s rekonstrukciót támogató software kiválasztása	16
3. táblázat: Az „A” minták mért értékei	34
4. táblázat: A „B” minták mért értékei	36
5. táblázat: A „C” minták mért értékei	38
6. táblázat: A „D” minták mért értékei	40
7. táblázat: Összesített érték táblázat	41
8. táblázat: Az „A” minták megfelelőségének értékelése.....	43
9. táblázat: A „B” minták megfelelőségének értékelése.....	44
10. táblázat: A „C” minták megfelelőségének értékelése.....	45
11. táblázat: A „D” minták megfelelőségének értékelése	46