



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

BATTA TAMÁS BARNABÁS
TDK DOLGOZAT
SOLAR HAJÓ SZÁRNYVEZÉRLŐ EGYSÉGÉNEK
ANYAGFEJLESZTÉSE

Témavezető:

Tamás-Bényei Péter

adjunktus

Konzulens:

Sántha Péter

PhD hallgató

BUDAPEST, 2023

NYILATKOZATOK

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Batta Tamás Barnabás* (ENCBBK), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023.11.05.


szigorló hallgató

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Tamás-Bényei Péternek és konzulensemnek, Sántha Péternek az áldozatos munkájáért, amivel a dolgozat létrejöttét lehetővé tette. A Zoltek Zrt-nek az alapanyagok biztosításáért és a BME Solarboat Teamnek a szakmai támogatásért. Végül szeretnék köszönetet mondani családomnak és barátnőmnek, Enikőnek a tanulmányaim során nyújtott támogatásért.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás.....	iii
Jelölések jegyzéke.....	vi
1. Bevezetés.....	2
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. A kompozitok	4
2.2. Hőre lágyuló technológiák.....	5
2.2.1. Rövidszál erősítésű FDM nyomtatás.....	6
2.2.2. Folytonos szál 3D nyomtatás	7
2.3. Térhálós mátrixú technológiák.....	8
2.3.1. BMC.....	8
2.3.2. SMC.....	9
2.3.3. Prepreg technológiák.....	10
2.3.4. Forged carbon.....	11
2.4. Fenntarthatóság	13
2.4.1. Szálvisszanyerési eljárások	13
2.4.2. Újrahasznosított szénszál alkalmazásának lehetőségei	14
2.5. Összegzés	14
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések.....	16
3.1. Felhasznált alapanyagok.....	16
3.1.1. Epoxigyanta	16
3.1.2. Vágott szénszál	16
3.1.3. PLA	17
3.2. Alkalmazott berendezések és vizsgálati módszerek.....	17
3.2.1. Próbatest gyártás	17
3.2.2. Szerszámgyártás	17
3.2.3. Mechanikai vizsgálatok.....	18
3.2.4. Mikroszkópi vizsgálatok.....	19
4. A szárnybekötő elem anyagtechnológiai tervezése.....	22
4.1. Szárnybekötő elem szimulációja	22
4.1.1. Az alkatrész feladata, terhelések.....	22
4.1.2. Szimuláció.....	23
4.2. Anyagfejlesztés	24
4.2.1. Száltartalom hatásának vizsgálata.....	25

4.2.2.	<i>Eltérő gyantarendszerek hatásának vizsgálata</i>	29
4.2.3.	<i>Eltérő keverési módszerek hatásának vizsgálata</i>	32
4.3.	Szerszámtervezés	35
4.3.1.	<i>Az első prototípus</i>	35
4.3.2.	<i>A második szerszám</i>	36
5.	ÖSSZEFOGLALÁS	39
5.1.	Magyar nyelvű összefoglaló	39
5.2.	Idegen nyelvű összefoglaló	40
5.3.	További megoldásra váró feladatok	40
6.	Felhasznált források	42

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
D_w	ellenállási erő	N
L	felhajtó erő	N
L_c	kritikus szálhossz	mm
D	átmérő	mm
E	modulus	GPa

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
σ	szakítószilárdság	MPa
τ	nyírófeszültség	MPa

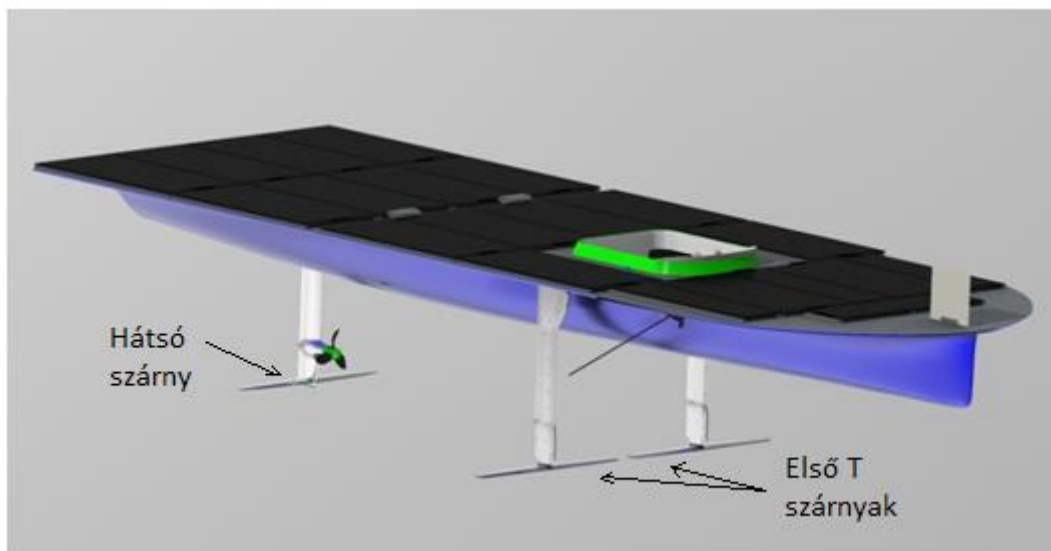
Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
UD	unidirekcionális kelme
MD	multidirekcionális kelme
ABS	akril-butadién-sztirol
PET	polietilén-tereftalát
BMC	Bulk Mould Compound
SMC	Sheet Mould Compound
FDM	Fused Deposit Modelling
PP	polipropilén
PLA	politejsav
PA	poliamid
FC	forged carbon
SEM	pásztázó elektronmikroszkóp

1. BEVEZETÉS

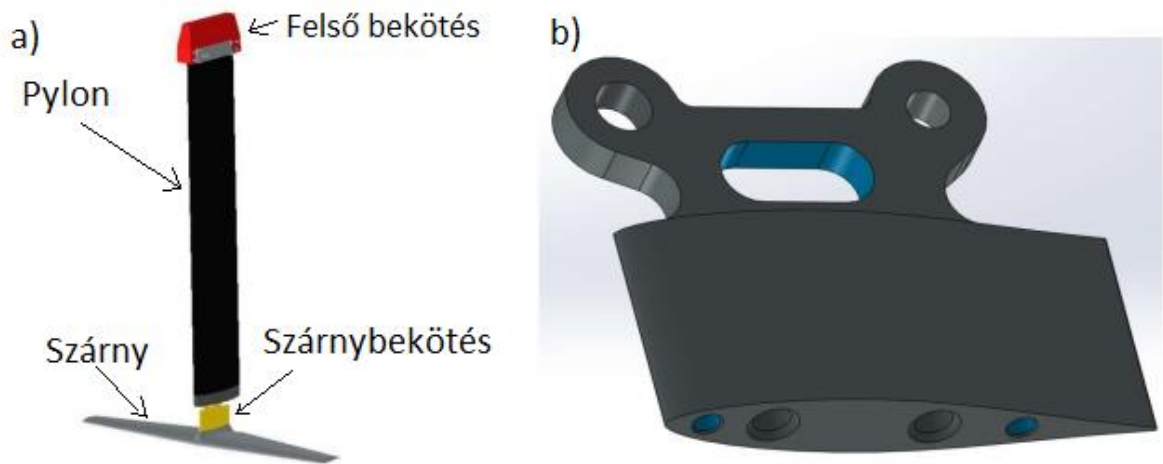
Az utóbbi években a közlekedés minden területén egyre fontosabb szemponttá vált a fenntarthatóság, ami miatt egyre inkább előtérbe kerülnek az alternatív hajtásrendszerek. Ezen rendszerek fejlesztése mellett a tömegcsökkentésre irányul a járműipar fókuszja, ami nagyobb energiahatékonyságot eredményez, és növeli a hatótávot is. Habár az elektromos közlekedés forradalma egyelőre főként az autóiipart és az egyéb személyi közlekedési formákat (elektromos kerékpár, roller) érinti, azonban egyaránt megjelent már a repülésben és a hajózásban.

Utóbbi igyekszik ösztönözni mérnökhallgatók körében az Energy Boat Challenge versenysorozat, amely napelemes és hidrogéncellás hajóosztályban indít versenyeket. A versenyek során a csapatok klasszikus versenyszámokban is megmérettetik magukat, ahol a hajók gyorsaságát, manőverezőképességét vizsgálják, azonban a középpontban az energiahatékonyság áll. Emellett fontos szerepet kapnak a fenntarthatóság egyéb területei is, mint a hulladékkezelés, az életciklustervezés, az újrahasználatosság és az újrahasznosítás. Ezen a versenysorozaton méreti meg magát rendszeresen a 2014-ben alakult BME Solar Boat Team csapata is, amely második hajójának, Lanának hidrofoil-os rendszerén dolgozik. Ennek segítségével a hajó képes kiemelkedni a vízből, így drasztikusan lecsökkenti a nedvesített felületet, ami kisebb ellenálláshoz vezet, így nagyobb hatótáv érhető el. Ahogy az 1. ábra is szemlélteti a hidrofoil rendszer 3 db „T” kialakítású szárnyból áll, amelyek közül 2 a pilótafülke mellett, egy pedig a hajtóműházon kerül kialakításra. A szárnyak vezérlése mechanikus módon történik.



1. ábra Lana szárnyelrendezése

A 2. ábra mutatja az első szárnyak kialakítása, valamint a vezérlés része a szárnybekötő elem, amelynek feladata, hogy kapcsolatot teremtsen a szárny, a pilon és a vezérlés közt.



2. ábra Az első szárnyak elrendezése (a) és a szárnybekötő elem (b)

A bekötő elem felső részén található két csapágyazott csatlakozó pont, amelyek közül a belépőél felőli oldalon található a pylon alsó részéhez kapcsolódik, és csak elforgásra képes, amíg a kilépőél felőli a mechanikus vezérléshez. Ez Z irányban mozdul el, valamint képes azt ezt kiegyenlítő forgó és X tengely irányú elmozdulásra is a szárnyszög szabályozása során. Az alkatrész a szárnyhoz 2 db M8-as csavarral kapcsolódik, a megfelelő kapcsolódást inzertezéssel tettük lehetővé, valamint a könnyebb szerelhetőséget figyelembevéve 2 pozícionáló csapot is kapott. Ezen konstrukció tervezése csapattársam, Dobos Ágoston munkája.

A TDK dolgozatomban szeretném, ezt az eredeti tervek szerint alumínium alkatrészt kompozit anyagból elkészíteni, aminek célja a tömegcsökkentés, valamint egy olyan metódus fejlesztése, ami a későbbiekben kisebb terheléseket felvevő alkatrészek gyártástechnológiájaként is szolgálhat és a metódus alkalmas lehet újrahasznosított szálak alkalmazására is, a fenntarthatóság jegyében.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az anyagtechnológiai tervezés során egy komplex problémát kellett megoldanom. Az alkatrész bonyolult geometriájú, ezért figyelembe kellett venni, hogy a választott technológiával ez előállítható legyen. Emellett az áramvonalas felület (szárnyprofil) miatt szükséges a jó felületminőség, az inzertek és csapágyazás pedig magas méretpontosságot igényelt. Ezeket nem feltétlenül szükséges a gyártáskor elérni elég, ha a választott technológiával előállított termék utómunkálatokkal (fúrás, dörzsárazás, csiszolás) az előírásoknak megfelelően kialakítható. A tervezett terheléseken kívül egyéb, előre nem látható komplexebb terhelések is felléphetnek a komplex áramlási viszonyok, valamint a vízi közlekedésben előforduló szennyeződések, természetes akadályok jelentette hirtelen hatások nyomán. A választott technológiának a csapat rendelkezésére kell állnia és segítségével az alkatrésznek kis szériában (5-15 db) gazdaságosan gyárthatónak kell lennie. A fenti részleteiben tárgyalt szempontok miatt érdemes a kompozit technológiák felé fordulni, azonban fontos, hogy olyan technológiát érdemes választani, amivel vagy kvázi izotróp rendszert lehet létrehozni, vagy a gondos rétegtervezéssel a komplex igénybevételeknek is képes az alkatrész ellenállni.

2.1. A kompozitok

A kompozitok olyan összetett, többfázisú rendszerek, amelyeket egy nagyszilárdsággal és modulussal rendelkező erősítőanyag, és az erősítőanyagot befoglaló szívós mátrix anyag alkot. A két alkotó között kiváló adhéziós kapcsolat áll fenn [1,2]. Az erősítőanyagok egyik legfontosabb tulajdonsága a kritikus szálhossz (L_c). Ez alatt az érték alatt a szál terhelés hatására kicsúszik a mátrixból, ezáltal nem képes felvenni a szakítószilárdságának megfelelő terhelést. A kritikus szálhosszt a Kelly-Tyson összefüggéssel határozhatjuk meg, az elemiszál szakítószilárdságának (σ), átmérőjének (D) és a szál felületén ható nyírófeszültség (τ) ismeretében. Ez az érték a szál és a mátrix típusától függ, kísérleti módszerekkel, például csepplehúzással határozható meg:

$$\frac{L_c}{D} = \frac{\sigma}{2\tau} \quad (1)$$

Az erősítőanyagok az igénybevétel nagyságától és az alkalmazás területétől függően igen változatosak struktúrájukban és alapanyagukban egyaránt. A legelterjedtebb erősítőanyag az üveg- és a szénszál, amik széleskörben elérhetőek és kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. A fenntarthatóság jegyében az utóbbi években egyre több kutatásnak a került a fókuszába a megújuló forrásból származó erősítőanyagok használata. Ide tartozik többek között a szizál, a kender, és farost, azonban ezek mechanikai tulajdonságai messze elmaradnak a korábban említett üveg és a szén tulajdonságaitól. Az erősítőstruktúrák is változatosak, a legelterjedtebb a szál erősítés, ahol alkalmazhatnak rovingokat, unidirekcionális kelméket (UD, egyirányú) és multidirekcionális (MD, többirányú) szöveteket, vagy kitüntetett erősítési iránnyal

nem rendelkező (síkban kvázi izotróp) paplant, emellett kötött, fektetett és fonott erősítőanyagokat egyaránt. A mátrixanyagok is szerte ágazók, vannak kerámia, fém és polimer mátrixszú kompozitok.

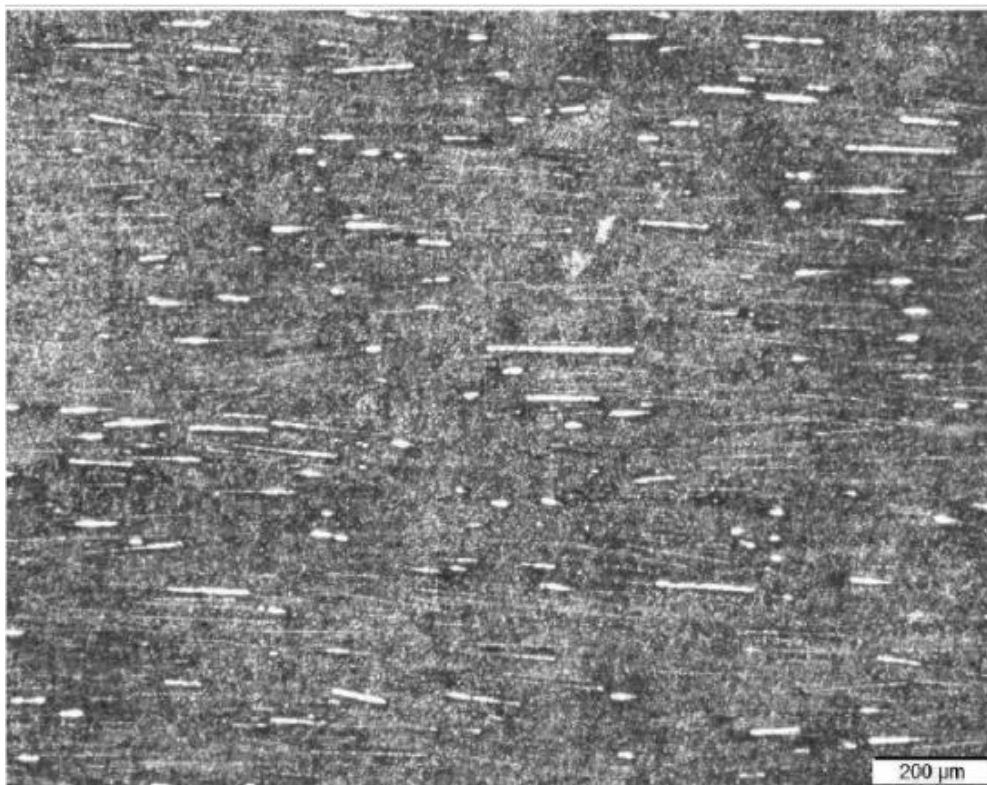
A terhelés jellege és nagysága, valamint a csapat számára elérhető technológiákat figyelembevéve kutatásomban csak a polimer mátrixszú kompozitokkal megvalósítható technológiákat vizsgáltam. A polimermátrixok is két nagy csoportra oszthatók, a hőre lágyulóakra (pl.: Akril-butadién sztírol, Polietilén-teraftalát) valamint a térhálósokra (pl.: epoxi, poliészter). A hőre lágyulók előnye a változatos alapanyag, valamint az újrahasznosíthatóság, hiszen megömlesztve és darálva ismét felhasználhatók. Hátránya, hogy elsősorban csak rövid, legfeljebb pár milliméteres szálak használhatók, valamint ennél bonyolultabb erősítőstruktúra csak speciális berendezésekkel alkalmazható. Emellett a legkíméletesebb feldolgozás során is degradálódnak a szálak, ami mechanikai tulajdonságcsökkenést eredményez. A térhálós anyagok előnye, hogy változatos erősítőstruktúrák és eljárások közül választhatunk a felhasználási cél függvényében. A terhelésekre tudjuk optimalizálni a szerkezet kialakítását a megfelelő rétegrend megválasztásával, de vannak eljárások, amikkel kvázi izotróp szerkezet hozható létre (BMC, paplan erősítés). Hátrányuk, hogy több előkészítő lépést igényelnek, valamint az újrahasznosítás ipari léptékben még nem megoldott, emellett a mátrixanyag a kutatások szerint is legfeljebb fűtőanyagként kerül újrahasznosításra, azaz egy *downcycling* valósul meg. A szálak visszanyerésére van lehetőség, azonban a visszanyerés hatással van a szálak mechanikai tulajdonságaira [3].

2.2. Hőre lágyuló technológiák

Elsőként a hőre lágyuló mátrixon alapuló technológiákat vizsgáltam a saját szempontrendszerem szerint. Voltak technológiák, amelyek az elkészítendő termék bonyolult geometriája miatt nem alkalmasak a gyártásra, ilyen többek közt a vákuumformázás. Emellett az előgyártmány (lemez) előállításához szükség lett volna extruderre is, így viszonylag körülményessé téve a gyártást. A másik elvetett megoldás a fröccsöntés volt, amely a bonyolult formákat helyes szerszám tervezéssel könnyedén felveszi, és a felületi minőség is kiváló. Emellett az inzertezésre is bevett módszerek állnak rendelkezésre (megvalósítható ráfröccsöntéssel és utólag melegen sajtolással is). A technológiával szálerősített anyagok is feldolgozhatók, ezek orientáltsága azonban jelentősen függ a befroccsöntési iránytól, valamint mag-héj szerkezet alakul ki a késztermékben. A technológia azonban a magas szerszámköltségek miatt nagyszorozatszámú termékek esetén optimális. Kisebb sorozatokhoz, próbagyártásokhoz készítenek epoxi szerszámokat is, azonban ezek elkészítése is rendkívül időigényes és komoly szakértelmet és speciális eszközöket igényel [4]. Egy lehetséges megoldás lehet a 3D nyomtatás, ahol az elmúlt években jelentős előrelépés történt a szálerősített anyagok felhasználásában. A leggyakrabban szénszál erősítésű filamentek már kiskereskedelmi forgalomban is elérhetőek.

2.2.1. Rövidszál erősítésű FDM nyomtatás

A Fused Deposit Modelling (FDM) ma a legelterjedtebb additív gyártási eljárás hiszen, köszönhetően egyszerű felépítésének, valamint annak, hogy az anyagi belépési küszöbe is viszonylag alacsony. Emellett széleskörű szoftveres támogatás (ingyenes CAD és szeletelő programok) áll rendelkezésre, amelyekhez oktató anyagok is elérhetőek. Tehát a technológia egyszerűen elsajátítható és sokoldalú, ezért a hobbicélú felhasználóknak is vonzó lehet. Az FDM működése az extrúzióval előállított polimer szál (filament) feldolgozásán alapul. A feltekercselt filamentet csigák segítségével a nyomtatófejbe továbbítjuk, ahol fűtőelemek segítségével megömlesztjük, majd a fúvókán keresztül a tárgyasztalra juttatjuk, majd rétegről rétegre építjük fel a kívánt geometriát a nyomtatófej mozgásával. A folyamat elvégzését követően a kész termék eltávolítható a tárgyasztalról. A feldolgozás során a technológia miatt a szálak orientálódnak, ezért a nyomtatási iránnyal párhuzamosak lesznek az erősítőszálak.



3. ábra 8% rövidszállal erősített 3D nyomtatott PP hosszirányú keresztmetszete [5]

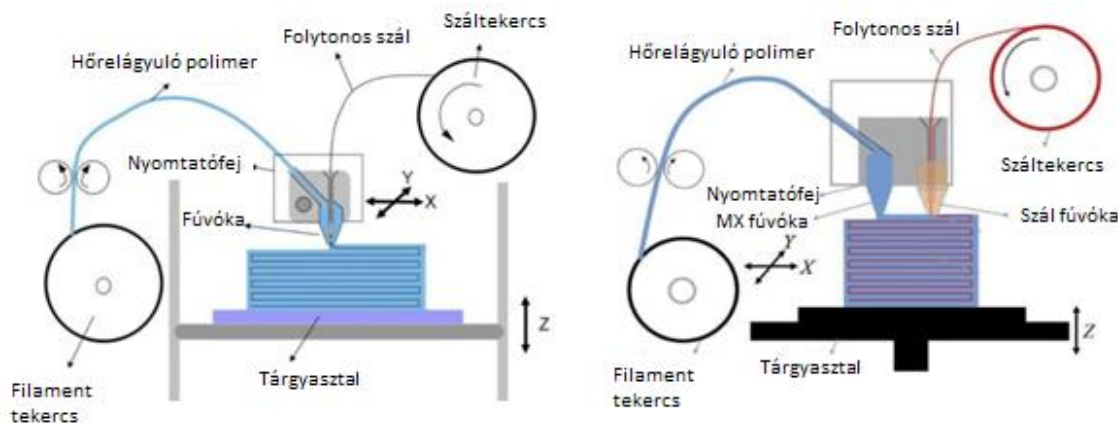
A 3. ábra ezt a jelenséget szemlélteti 8% szénszállal erősített PP esetén. A piacon elérhetőek politejsav (PLA) és poliamid (PA) alapú szénszálerősített filamentek, ezek szénszál tartalma 5-20m% között mozog [6], és elérhetőek üvegszállal erősített anyagok is a piacon [7]. A kutatásokban 60-400 μm nagyságú szálhosszt voltak képesek elérni a filamentben [8,9], ez azonban gyakran a kritikus szálhosszt sem éri el [10], emiatt érdemi mechanikai tulajdonságjavulásról egyelőre nem beszélhetünk. A szálhossz növelés gátja éppen a filament extrúziós előállítási technológiában rejlik,

hiszen a feldolgozás során az extrudercsiga mentén a szálak degradálódnak. A kisebb fordulatszám a homogenitást csökkenti, ami egyenetlen anyagkihozattal és a mechanikai tulajdonságokat eredményez, emellett növeli a tartózkodási időt, ami a gazdaságosság rovására megy.

2.2.2. Folytonos szál 3D nyomtatás

A rövidszál 3D nyomtatás hátrányait küszöböli ki, egy még kevésbé elterjedt módszer, a folytonos szállal történő additív gyártás. Itt megkülönböztetünk „in situ”, az az közvetlenül a gyártási folyamat előtt, a nyomtató fejben, vagy a tárgyasztalon történő szál impregnációt, illetve az előre átitatott folytonos szálakat (Towpreg), amik szintén FDM-mel megvalósítható eljárások [11].

Az „in situ” eljárások közül az egyik lehetséges módszer, hogy a nyomtatófejben megömlasztett mátrixanyagot közvetlenül a fúvóka előtt visszük fel a szál felületére, majd így visszük fel a tárgyasztalra [12]. Ennek másik változata, amikor a szál és a mátrixot külön nyomtatófej vagy fúvóka segítségével adagoljuk, így a szálak impregnációja csak a tárgyasztalon történik meg [13]. Ezeket az eljárásokat szemlélteti a 4. ábra. Szintén az „in situ” eljárásokhoz sorolható az „in line” eljárás, ami térhálós mátrixok esetén alkalmazható legegyszerűbben. Ennél az eljárásnál a folytonos szálakat mátrix fürdőn vezetik át, ezután kerülnek a nyomtatófejbe, majd a tárgyasztalra.



4. ábra „In Situ” eljárások, szálnedvesítés a fejben (a) és a tárgyasztalon (b) [12]

A towpreg eljárásoknál a folytonos szálakat már körülvették a mátrixanyaggal, beállítva a megfelelő szál-mátrix arányt. A nyomtatás során ezt juttatjuk a nyomtatófejbe, ahol a mátrix megömlik, majd a fúvókán keresztül a keveréket felvisszük a tárgyasztalra [14]. A towpreg eljárás előnye az „in situ” eljárásokhoz viszonyítva, hogy egyszerűbb géppel is végezhető, ugyanakkor a vásárolt filament meghatározza a szálarányt, azon később nem változtathatunk. A folytonos szál 3D nyomtatások egyelőre kísérleti fázisban vannak, az ipari alkalmazás egyelőre vár magára. Az additív gyártástechnológiák ciklusideje magas, valamint az alkatrész

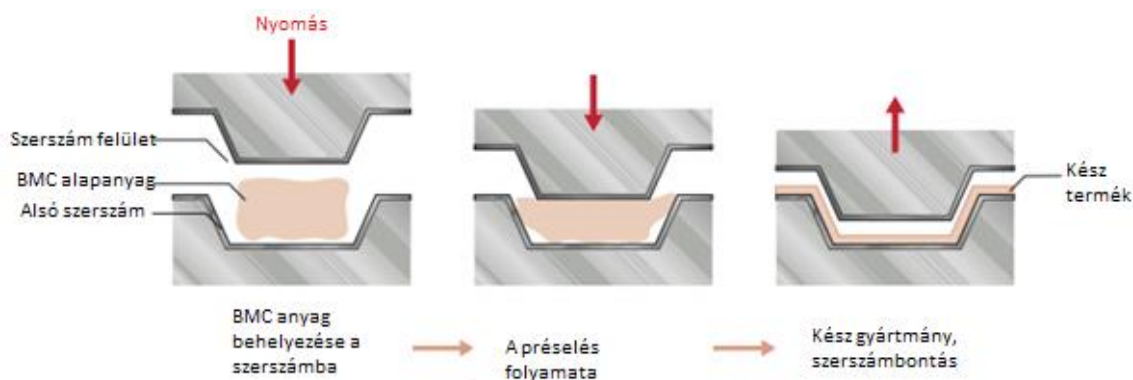
építési irányban kisebb teherviselésre képes, a rétegek közt felléphet a rétegelválás jelensége.

2.3. Térhálós mátrixú technológiák

A térhálós mátrixú technológiákat másodikként vizsgáltam. Ezeknél az eljárásoknál, ellentétben az additív gyártástechnológiákkal, mindenképpen szükség van valamilyen szerszámmra, ami egyéb technológia bevonását teszi szükségessé. Szerszám gyártásnál a CNC marás, valamint a 3D nyomtatás is szóba jöhet. A térhálós technológiák közül a kézilaminálás a bonyolult geometria miatt nehezen megvalósítható, még szerszám segítségével is, emellett a szórás is alkalmatlan erre a célra. Ellenben az előre impregnált erősítőszálakon alapuló Bulk Metal Compound (BMC), valamint az erősítőszöveten alapuló Sheet Metal Compound (SMC) és prepreg technológiák alkalmasak a műszaki probléma megoldására.

2.3.1. BMC

A BMC eljárás rövid, vágott erősítő szálak (6-12 mm) átimpregnálásán alapul, emiatt az előgyártmány jellegzetes állagú. Az erősítőanyagként leggyakrabban üvegszál, bizonyos esetekben akár szénszálat is használnak. Emellett számos más, megújuló anyagból készült szálat is felhasználnak, mint a szizál vagy a kender. A mátrix anyagok lehetnek különböző gyanták (epoxi, poliészter), töltő- és adalékanyagok hozzáadásával. Az SMC-nél jellemzően kisebb száltartalommal, és nagyobb töltőanyag hányaddal rendelkeznek [15, 16]. Az előgyártmány alakadását az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra Előgyártmány alakadása BMC esetén [17]

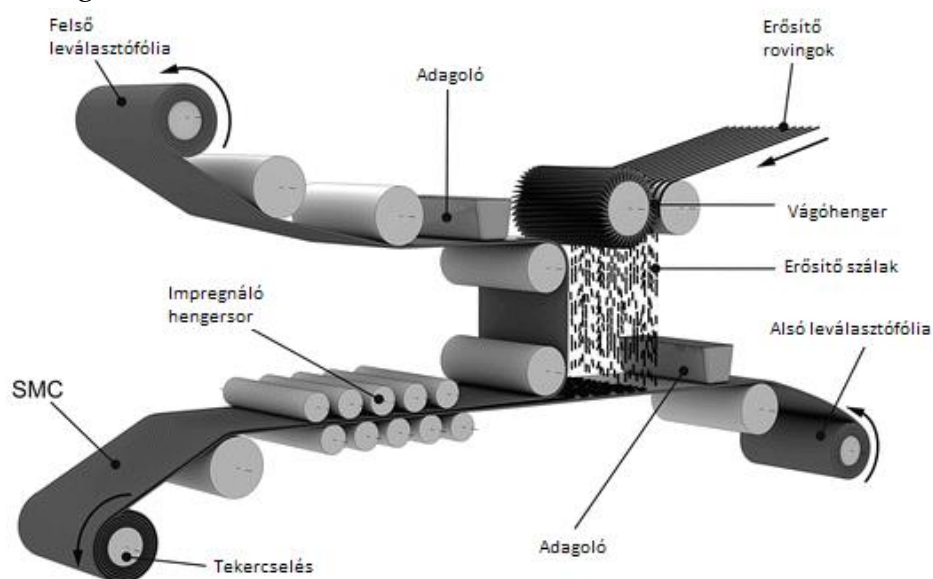
A gyártás általában acél, kétoldali (pozitív-negatív), fűtött szerszámmal történik. Az eljárás 140-160 °C-os hőmérsékletet és terméktől függően 25-250 bar nyomást igényel. A szerszámából való eltávolítást követően befejező lépések, például sorjázás, lakkozás lehetnek szükségesek [18]. Az eljárás előnye a jól beállítható száltartalom, az SMC-hez képest kisebb gépigény, valamint az egyszerűbb gyártáselőkészítés. Hátránya az SMC-hez képest, a kisebb száltartalom okozta kisebb mechanikai tulajdonságok,

valamint a kézi módszerekhez képest az előkészítő műveletek még mindig hosszadalmasak, a szerszámkitöltés pedig ugyanazt a módszert igényli, mint az egyszerűbb előgyártmány előállításának esetében.

Egy lehetséges megoldás lehet a laborkörülmények között előállítható BMC anyagra C. Capela és társai munkája [19]. Kutatásuk során $0,5 \pm 0,15$ mm-es szálak eloszlathatóságához előzetesen diklór-metán oldószerbe áztatták azokat, 1 g szálhoz 150 ml oldószert alkalmazva, ezt követően a szálakat és a gyantát 5 percig mechanikusan keverték, majd 1 percig pihentették. Ezután 7 percig ultrahanggal kezelték az oldószerben, ami jelentősen javította a szálak eloszlathatóságát az utolsó lépésben, miután szűrő segítségével elkülönítették a szálaktól az oldószert, majd 40 órán át pihentették. Végül a kezelt és pihentetett szálakat meghatározott százalékban keverték hozzá az epoxigyantához és lassú keverést követően vákuum alá helyezték. A termék előállításához mechanikus prést és fém szerszámot használtak. A gyártást szobahőmérsékleten végezték, 20 órán keresztül, majd a terméket utóhőkezelték 70°C -on további 12 óráig. Az erősítőanyag nélküli gyanta szakítószilárdsága $67,2 \pm 0,9$ MPa volt, ezen kívül 5, 10, 15, 17,5 és 20m%-os erősítőanyag-tartalmat vizsgáltak. A legnagyobb szakítószilárdságot, $102,5 \pm 0,7$ MPa-t a 17,5m% erősítőanyag-tartalmú mintával érték el.

2.3.2. SMC

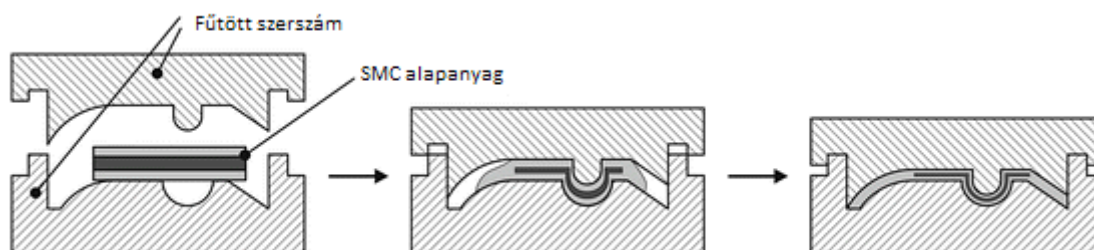
Az eljárás során a rendezett szálakat előre átimpregnálják térhálósodó mátrixanyaggal. A szövet leggyakrabban üveg, vagy szén-szál, a mátrixanyag poliészter vagy epoxi. Az előgyártmányt egy folyamatos üzemből működő SMC gyártósoron végzik, amit a 6. ábra mutat.



6. ábra SMC gyártósor [20]

Az SMC anyagot két leválasztófólia között készítik el, amit csak közvetlenül a felhasználás előtt távolítanak el. A felső leválasztófóliát egy hengerson juttatják el az

adagolóig, ami a gyantából, térhálósító anyagból, töltő- és adalékanyagokból álló keveréket visz fel a leválasztófolia felületére. Egy másik hengeren az erősítőanyagot vezetik be, majd azt vágják 25-50 mm nagyságúra és az alsó leválasztófoliára orientáltan viszik fel. Ezt követően a két leválasztófoliát egy hengerson átvezetve préselik össze, ahol megtörténik a szálak impregnációja. Utolsó lépésként az elkészült SMC előgyártmányt tekerceslik. A végtermék előállításához az előgyártmányból megfelelő nagyságú, általában trapéz vagy téglalap alakú rétegeket vágnak ki, ezeket egymásra fektetik, és behelyezik a szerszámba. A teljes kitöltéshez általánosságban a szerszámfelület 70%-át kell fednie az előgyártmánynak.



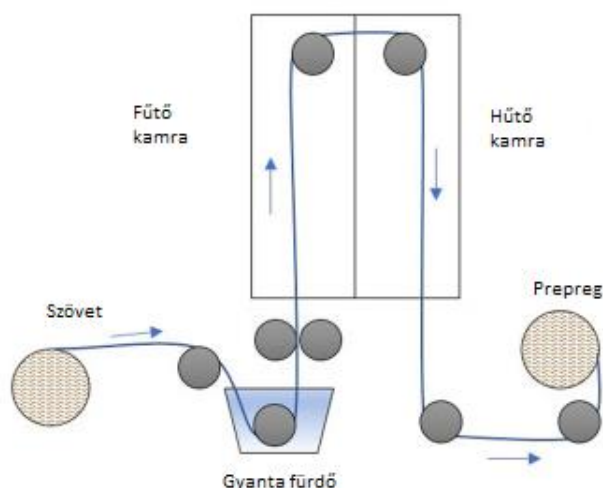
7. ábra Kétoldalú SMC szerszám [20]

A szerszám általában kétoldalú (7. ábra), pozitív-negatív acélszerszám, azonban sorozatszámától függően alumínium szerszám is alkalmazható. A szerszámot 140-160 °C-on üzemeltetik, a présnyomás 25 és 250 bar közt változhat. A szerszámból eltávolítást követően befejező lépésekre lehet szükség, többek között sorjázásra, fúrásra, lakkozásra, a felhasználási céltól és területtől függően [20].

Az eljárás előnye, hogy az előállítás során a szálak nem töredeznek, az előgyártmány könnyen kezelhető, a szálarány előre, pontosan beállított, így közel konstans mechanikai tulajdonságokat tud biztosítani. Hátránya, hogy az előállítása összetett, bonyolult folyamat magas gépigénnyel, a rétegek kialakítása figyelmet és szakértelmet kíván, rétegtervezés és ezzel párosuló szimuláció is szükséges lehet. További hátránya lehet, hogy a rétegek méretre szabásánál jelentős vágási felesleg keletkezik.

2.3.3. Prepreg technológiák

A prepreg hasonlít az SMC előgyártmányára, azzal a különbséggel, hogy itt végtelen szálak alkotta kelmét, ami lehet UD és MD egyaránt, impregnálunk át előre. Az impregnálásnak két elterjedt technológiája van, a „hot melt” eljárásban gyantafilmot préselünk az erősítőstruktúrába emelt hőmérsékleten. Az oldatos eljárásban az erősítőanyagot gyantafürdőn vezetjük át, majd kalanderezéssel érjük el a teljes átitatottságot és a kívánt gyantatartalmat [21]. Utóbbit szemlélteti a 8. ábra.



8. ábra Oldószeres impregnáció [21]

Ma a prepreg a kompozit technológia csúcsa, széleskörben alkalmazzák a repülőgépiparban és az űrkutatásban. Gyakran alkalmazzák szendvicstruktúrában méhsejttel vagy más maganyaggal [22]. A kívánt termékhez először kivágják a megfelelő nagyságú prepreget, ezeket a megfelelő orientációban a szerszámba fektetik, majd vákuum zsákba helyezik. Ezután a terméket az autoklávban vákuum alatt, emelt nyomáson és a gyártó által előírt hőmérséklet program mellett gyártjuk le. Ezzel a technológiával szűrhető ki leginkább a hibahelyek keletkezése, valamint ezzel érhető el a legjobb szál-mátrix arány is. A technológiával az inzertezés is megoldható, valamint a jól megválasztott rétegrenddel a komplex terheléseket is fel tudja venni, az alkatrész károsodása nélkül. Azonban ezek előkészítése körülményes, valamint a terhelések mértéke nem indokolja egy ennyire high-tech eljárás alkalmazását. Emellett ennek a költségei is magasak.

2.3.4. Forged carbon

A forged carbon egy a BMC-vel rokon eljárás. A kettő közötti különbség, hogy amíg a BMC esetén az előgyártmány elkészítése jóval korábban, akár más üzemben készül, addig a forged carbonnál közvetlen a gyártás előtt, vagy közben történik meg. Ez az eljárás nem rendelkezik olyan egzakt leírással sem a szálhosszokat, sem az előkészítési eljárásokat tekintve, mint a BMC vagy az SMC. Általában komplex szerszámokat használunk, de emelt hőmérsékletet nem feltétlenül alkalmazunk. A forged composite megalkotója a Lamborghini volt [23], amely a Sesto Elemento felfüggesztésének vezérlőkarjainál alkalmazta ezt a technológiát. A Lamborghini mérnökei 25,4 mm hosszú szálakat alkalmaztak, amiket véletlenszerű orientációban juttattak a szerszámba, 2 gyantafilm réteg közé. A szerszámot présbe helyezték és 160 °C-on, 103 bar nyomáson tartották 5 percig. Céljuk az alumínium lengőkar kiváltása volt a tömegcsökkentés jegyében. Az elkészült vezérlőkarokat a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra A Lamborghini Sesto Elemento felfüggesztésének vezérlőkarjai [23]

Az előtte alkalmazott alumínium 260 MPa szakítószilárdsággal rendelkezett, amíg a Forged Composite 246 MPa-t ért el.

Mivel az irodalomban egzakt definíciót nem találtam a forged carbon eljárásra, ezért az alábbi definíciót állítottam fel: Forged carbon alatt azt a térhálós mátrixú, 6-25 mm szálhosszú szén erősítőanyagot tartalmazó kompozitot értjük, ahol a mátrix és az erősítőszálak elkeverése közvetlenül a gyártás előtt történik, ami lehetővé teszi egy kvázi izotróp rendszer kialakítását. A gyártás során 1-100 bar nyomás segítségével, emelt vagy szobahőmérsékleten, préseljük az anyagot a szerszámba, kialakítva a kívánt geometriát.

Fontos azonban tisztázni azokat a paramétereket is, amire a definíció nem tér ki, így elsőként megvizsgáltam a keverést. Az egyik lehetséges módszer, ha a térfogat alapján előre kikészítjük a megfelelő mennyiségben a vágott szálakat és a gyantát, majd a szálakat a gyantával kézzel és ecsettel visszük fel a szerszám felületére, azaz az átnedvesítés a szerszámban történik [24]. Ennek hátránya a viszonylag hosszú, nehézkes felvitel a szerszámba, valamint a megfelelő átítatás kialakítása. Emellett bizonyos geometriák esetén ez az eljárás nem is alkalmazható. Egy másik lehetséges megoldás, amelyet a BME Suborbitals versenycsapat már sikerrel alkalmaz, hogy a szálakat előzetesen egy edényben összekeverjük a gyantával és az így kapott pasztát visszük fel a szerszám felszínére. Ennek köszönhetően a szálak jobban elkeverednek a mátrixban, homogénebb szerkezetet kapunk, és a szálak teljes átnedvesítettsége is megoldott. Ugyanakkor ez egy nehezen szabályozható eljárás, a száltartalom nem teljesen pontosan beállítható, valamint az elkeverés minősége is erősen függ az operátor tapasztalatától. A harmadik módszer a keverő berendezés alkalmazása lehet, így szabványosítható az eljárás és kiszűrhető az emberi tényező.

2.4. Fenntarthatóság

Mivel a versenysorozat egyik célja a fenntarthatóság előre mozdítása, ezért ez az anyagválasztás esetén is egy fontos szempont. Az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kapott a kompozitok újrahasznosítása, elsősorban a jó minőségű szénszál visszanyerése és annak újra használata. Ennek oka, hogy azok a termékek, amikben nagy mennyiségben használnak szénszál erősítést (repülőgépek, szélturbinák) az életciklusuk végéhez közelednek. Az így keletkező nagymennyiségű kompozit hulladék hasznosítása a jó minőségű szénszál miatt akár gazdasági szempontból is jövedelmező lehet. Azonban ehhez a hagyományos hulladék lerakás, illetve energetikai újrahasznosítás helyett összetettebb eljárásokra van szükség.

2.4.1. Szálvisszanyerési eljárások

A szálvisszanyerési eljárásokat három fő csoportra oszthatjuk, ezek a mechanikus, a termikus és kémiai.

A mechanikus újrahasznosítás során a kompozit hulladékot darálják vagy őrlik, ezáltal rövid szálak és eltérő finomságú porok nyerhetők vissza [25]. A technológia előnye, hogy egyszerű, könnyen automatizálható és a szálvisszanyerési eljárások közül ennek a legkisebb az energiaigénye. Emellett az eljárás során nem keletkezik veszélyes melléktermék sem oldószer, sem gáz formájában. Hátránya, hogy a visszanyert szálak erősítőanyagként csak korlátoltan, inkább töltőanyagként alkalmazhatóak, így jelentős a folyamat során a downcycling jelensége. Downcycling alatt azt a folyamatot értjük, amikor az anyagot a korábbi értékéhez képest alacsonyabb formában tudjuk csak újrahasznosítani.

A második csoport a termikus szálvisszanyerési eljárások. A szálak visszanyerése két módszerrel valósítható meg, a pirolízissel és a fluidágyas módszerrel. A fluidágyas eljárás során a feldarabolt hulladékot kvarchomok fluidágyra fektetjük. A szálvisszanyerést úgy érjük el, hogy a 400-650 °C-ra melegített levegő segítségével a mátrixanyagot elbontjuk. Az így keletkezett anyagot szeparátorba juttatják, ahol elkülönítik a szálakat és a mátrix bomlási termékeit, amik később fűtőanyagként felhasználhatók [26]. Az eljárás jól automatizálható, azonban a visszanyert szénszálak hossza itt is korlátozott, viszont SMC és BMC esetén kiválóan alkalmazhatók. Hátránya a drága berendezés, valamint a visszanyert szálak mechanikai tulajdonságromlása. A pirolízis során inert atmoszférában szabályozott hőmérsékletprogram segítségével bontjuk a mátrixanyagot, atmoszférikus nyomáson. A folyamat során szálakat, töltőanyagokat nyerünk vissza, valamint az elbomlott mátrixanyagból olajak (benzol, toluol), gázok (CH₄, CO, CO₂) és korom keletkezik. Az eljárás viszonylag egyszerű, folyamatos eljárásba illeszthető. Hátránya, hogy a folyamat során a szálak is degradálódnak, így mechanikai tulajdonságuk csökken [27].

A harmadik csoportba a kémiai visszanyerések tartoznak. Ennek egyik lehetséges módszere a szolvólízis, ahol szuperkritikus állapotban lévő folyadékkal (víz, alkohol)

bontják a mátrixanyagot. Az oldószer bediffundál a szálak felszínére, majd reakcióba lépve velük leoldja a mátrixot. A folyamat jól szabályozható, az eljárás során a szálak teljes hosszukban visszanyerhetőek és a degradáció sem jelentős. Ezáltal azonos formában, közel ugyanolyan mechanikai tulajdonságokkal nyerhető vissza az erősítőanyag [28]. Az eljárás hátránya a magas beruházási költség és az energiaigényes működtetés. Kémiai eljárás a különböző savas oldószerek használata is, amik kisebb költségűek, mint a szolvólízis, azonban veszélyes melléktermékek keletkeznek. Emellett beszélhetünk elektrokémiai bontásról is, itt elektrolit közegben elektromos kisülések segítségével bontják a mátrixot [29].

2.4.2. Újrahasznosított szénszál alkalmazásának lehetőségei

A szálvisszanyerés kutatásainak következményeként már vannak gyártók, amelyek reciklált szénszálat is forgalmaznak rövid szál, valamint tűnemezelt paplan formájában. Ezek használata fenntarthatósági szempontból jelentős előnyöket hordoz, mert csökkenti az alkatrész környezeti terhelését, ökológiai lábnyomát. A rövid szállal erősített filamentek esetén vannak kutatások, amik ezeknek a szálaknak a használatára irányulnak [30], ugyanakkor kiskereskedelmi forgalomban nem kapható, és az ilyen filamentek előállítására idő és gépigényes, megfelelő hűtést és elhúzást is biztosítani kell. A térhálós technológiáknál legegyszerűbben a forged carbon eljárásnál alkalmazható, hiszen ott a keverék közvetlenül a gyártási lépés előtt készül, így az erősítőanyag könnyen cserélhető. BMC esetén amennyiben a technológiának megfelelő nagyságúra vágott szál beszerezhető, úgy szintén egyszerűen alkalmazható. SMC esetén az orientáció elérése az előre levágott szálakkal nehezen biztosítható. Gillet és társai [31] a korábban üvegszálból készült surfdeszka uszonyt gyártották sikeresen visszanyert szénszálból. A folyamat során szobahőmérsékleten, 10 bar nyomáson készítették el a mintákat, majd a termékeket. Turner és társai [32] a visszanyert szálakat BMC és SMC alapanyagként is alkalmazták, ahol céljuk az üvegszál kiváltása volt. A BMC előgyártmányt közvetlenül a visszanyert szálakból állították elő, gyantában történő elkeveréssel, majd a keveréket adalékanyagokkal stabilizálták. Az SMC anyag előállításához egy módosított papírgyártási folyamattal 10 g/m² területi sűrűségű paplant állítottak elő, majd ezt 5 alkalommal 40 baron préselték a megfelelő szálsűrűség eléréséhez. Végül 60 °C-on és 10 bar nyomáson 2 perc alatt impregnálták gyantafilm segítségével. A BMC anyaggal 70 MPa, az SMC anyaggal 280 MPa szakítószilárdságot tudtak elérni.

2.5. Összegzés

Az irodalomkutatásban megvizsgáltam, hogy mik azok az eljárások, amikkel a szárnybekötő elem legyártása megvalósítható. Hőre lágyuló technológiák közül a rövidszálas és a hosszúszálas nyomtatást vizsgáltam meg részletesebben. A két eljárás előnye, hogy nincs szükség szerszám kialakítására, tehát az alkatrész egy lépésben

gyártható, egyszerűen ellátható inzeretekkel és bármilyen geometria megvalósítható velük. Hátrányuk, hogy az építési irányban hajlamosak rétegelvásra, ami komplex terhelések esetén problémákat okoz, valamint hosszú a ciklusidő, és utómunkálati lépéseket is igényel. A rövidszálás eljárásnál a szálak hossza jelenleg erősen korlátozott és gyakran a kritikus szálhossz alatt maradnak. A hosszúszálás nyomtatás pedig kísérleti szakaszban van, egyelőre nehezen és nagy költségek mellett hozzá férhető, emiatt ezt a két megoldást elvettem. A térhálós technológiáknál elsőként a prepreget zártam ki, mivel a terhelés szintje nem indokolja egy ennyire high-tech anyag és eljárás alkalmazását. Az SMC is kiváló mechanikai tulajdonság elérését teszi lehetővé, azonban az előgyártmány előállításához összetett gyártási folyamatot igényel, ami rendkívül erőforrás igényes. Emellett a bonyolultabb geometriák előállításához a megfelelő méretű és alakú előgyártmányok kivágása, valamint ezek pozícionálása is komoly tapasztalatot és szakértelmet kíván meg, valamint a rétegrend tervezési lépésekhez is nagyobb szimulációs kapacitás szükséges. A 2 eljárás, ami közül végül döntenem kellett, az a BMC és a vele rokon forged carbon (FC). A BMC egy jobban szabályozott eljárás, szűkebb keretekkel, amíg a FC a tervezés során nagyobb szabadságot ad. A legfőbb különbség a 2 eljárás között, hogy amíg a BMC-nél az előgyártmány előállítása nem feltétlenül egy helyen és időben zajlik az alkatrész előállításával, addig a FC-nél ezek a lépések egymást közvetlenül követik. Így az FC-nél nem szükségesek térhálósodást gátló alapanyagok, sem hűtő az anyagok tárolásához. Mivel a csapatban nincs folyamatos igény erre a típusú alapanyagra, ezért érdemes azt a technológiát választani, ahol a tárolás és az anyagelőállítás egyszerűbben megoldható, ezért esett a választásom a forged carbon eljárásra.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

A szárnybekötő elem előállításához többféle vágott szálat, valamint epoxigyantát alkalmaztam az ideális kombináció megtalálásához. Emellett a keverési eljárások, valamint a hőmérséklet hatását is vizsgáltam.

3.1. Felhasznált alapanyagok

Ebben a fejezetben mutatom be a gyártási kísérletek során felhasznált alapanyagokat.

3.1.1. Epoxigyanta

A TDK dolgozatom során 3 eltérő gyanta rendszert vizsgáltam, az ipox (Budapest, Magyarország) termékei közül. Az MR 3010 egy módosított biszfenol A/F alapú laminálógyanta, amit 25 °C-on 800-1200 mPas-os viszkozitás és 1,10-1,15 g/cm³ sűrűség jellemez. Az epoxi egyenértéke 175-190 $\frac{g}{eq}$. Edzőként ipox MR 3124-et alkalmaztam. A módosított cikloalifás amin alapú edző 25 °C-on 40-70 mPas viszkozitású és 0,95 g/cm³ sűrűségű. Amin hidrogén egyenértéke 60 $\frac{g}{eq}$. A rendszert 100:33-ös keverési arány mellett 30-40 perces fazékidő és 500 mPas viszkozitás jellemzi 25 °C-on.

A másodikként az ipox MR 3016 gyantát (főalkotó: pentaeritrit tetraglicidil éter, viszkozitás 25°C-on: 0,9-1,2 Pas, sűrűség 25 °C-on: 1,24 g/cm³, epoxy egyenérték: 156-170 $\frac{g}{eq}$) és ipox 3124 edzőt alkalmaztam. A rendszert 100:40-es keverési arány mellett 25 perces fazékidő, valamint 800 mPas-os viszkozitás jellemzi 25 °C-on.

A harmadik, az MR 3012 öntőgyanta (főalkotó: glicerín triglicidil éter, viszkozitás 25 °C-on: 0,16-0,2 Pas, sűrűség 25 °C-on: 1,22 g/cm³, epoxy egyenérték: 140-150 $\frac{g}{eq}$) került megvizsgálásra. Ehhez ipox MR 3122 edzőt alkalmaztam (főalkotó: cikloalifás amin, viszkozitás 25 °C-on: 80-120 mPas, sűrűség 25 °C-on: 0,94 g/cm³, amin hidrogén egyenérték: 60 $\frac{g}{eq}$). A rendszer a 3 közül a leghosszabb, 100 perces fazékidővel rendelkezik, valamint a legkisebb, 200 mPas viszkozitással.

3.1.2. Vágott szénszál

A kísérletek során a Zoltek (Nyergesújfalu, Magyarország) által gyártott vágott szénszállal dolgoztam. A PX35 6 mm hosszúságú szál kiváló mechanikai tulajdonságokkal.

3.1.3. PLA

A termék elkészítéséhez szerszámot terveztem, amelyet 3D nyomtató segítségével Creality Ender PLA pro alapanyagból készítettem el, az egyszerű tervezhetőség és a relatív kis költségek miatt.

3.2. Alkalmazott berendezések és vizsgálati módszerek

A mérések során a BME Polimertechika Tanszékének laboratóriumaiban megtalálható berendezéseket alkalmaztam, amiket az alábbiakban részletezek.

3.2.1. Próbatétel gyártás

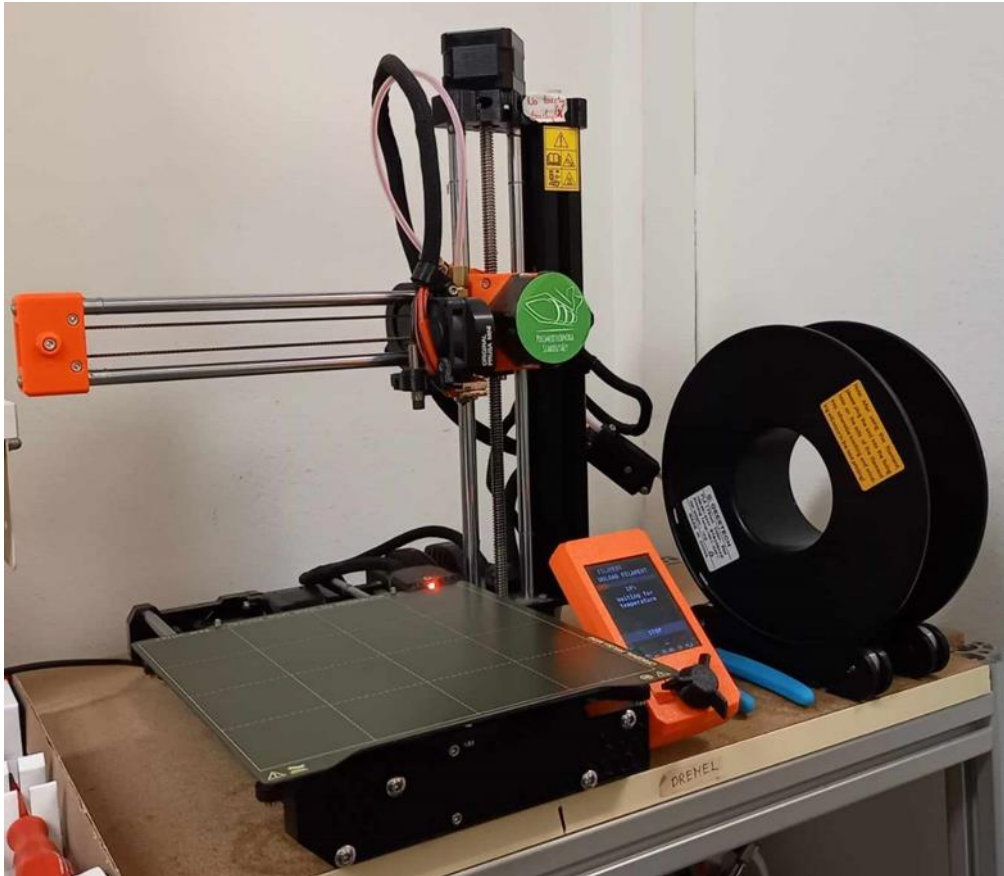
A TDK kutatásom során a próbatétel gyártásához egy Metal Fluid T30 típusú hidraulikus prést használtam (10. ábra). A kísérletek során 80 °C-os hőmérsékletet és 100 bar dugattyúnyomást alkalmaztam. A próbatétel legyártásához 3 részes alumínium szerszámot használtam a présben.



10. ábra Metal Fluid Engineering s.r.l. 30 T hidraulikus prés [33]

3.2.2. Szerszámgyártás

A szerszám elkészítéséhez egy Prusa Mini nyomtató alkalmaztam (11. ábra), amelyet a Polimertechika szakosztály bocsátott rendelkezésemre. A szerszámgyártás paramétereit a 4.3. fejezetben részletezem.



11. ábra Prusa mini nyomtató

3.2.3. Mechanikai vizsgálatok

A statikus mechanikai vizsgálatokhoz a Zwick Z050-es szakítógépét alkalmaztam (12. ábra), amelyhez szakító és hárompontos hajlító feltéteket használtam. A gép maximális terhelhetősége 50 kN, míg a szakítópofa 100 kN-ig terhelhető.

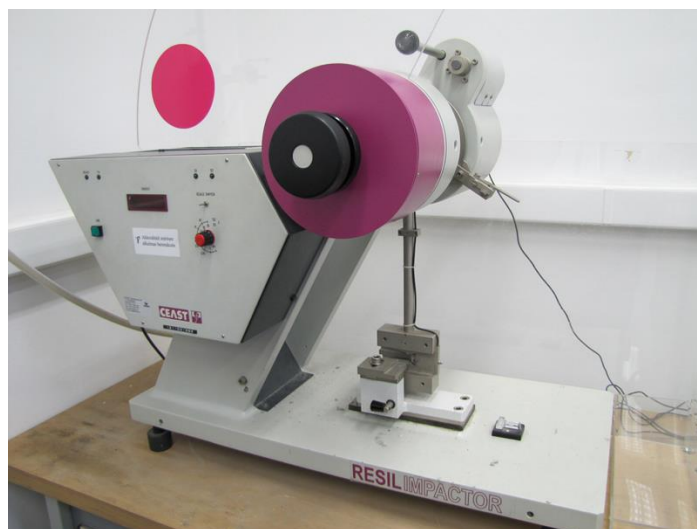
A szakítóvizsgálatot az MSZ EN ISO 527 4 2023 szabvány alapján végeztem $2 \frac{mm}{min}$ es szakító sebességgel, 5 N előterhelés mellett. A minták $L=200$ mm hosszúak és $b=20$ mm szélesek voltak.

A hajlítóvizsgálatot az MSZ EN ISO 14125 1999 szabvány szerint hajtottam végre. A minta hossza, $L=74$ mm, a szélessége, $b=15$ mm, míg az alátámasztás $l=60$ mm volt. A méréseket $1 \frac{mm}{min}$ -es szakítósebességgel végeztem.



12. ábra Zwick Z050 szakítógépet [34]

A dinamikus mechanikai jellemzőket a Ceast Resil Impact Junior ütőmű segítségével (13. ábra) végeztem el a Charpy féle vizsgálatot, a kisebb 2 J-os kalapácsot használva. A kitérés szöge 140° . A Charpy féle ütővizsgálatot az ISO 179-1 szabvány alapján végeztem el. A vizsgálatához 80 mm hosszú és 10 mm széles bemetszett próbatestet alkalmaztam, élrányú elrendezésben.



13. ábra Ceast Resil Impact Junior ütőmű [35]

3.2.4. Mikroszkópi vizsgálatok

Az elkészített mintákat hagyományos optikai mikroszkópiával és pásztázó elektronmikroszkópiával vizsgáltam meg. A mérésekhez használt Olympus fénymikroszkópot a 14. ábra mutatja.



14. ábra Olympus BX51M [36]

A 100-szoros nagyításra képes optikai mikroszkóphoz szükséges mintaelőkészítést a Struers LaboPol-5 polírozógéppel végeztem (15. ábra), amely 50 és 500 1/min fordulatszám közt állítható és szuszpenziós polírozással akár 1 μm -es finomság is elérhető.



15. ábra Struers LaboPol-5 polírozógép [37]

A minták beágyazásához az ipox 3016/3124 öntőgyanta rendszerét alkalmaztam, majd a minta előkészítést a polírozógép gyártójának, a Strausznak az előírásai alapján készítettem elő, 3 lépésben. Elsőként a 220-as jelű SiC csiszolókorongot 300 rpm-es fordulatszámmal, 1 percre alkalmaztam. Az előterhelés 20 N, a kenőanyag víz volt. Második lépésként a Struers MD-Largo nevű korongját használtam, amely 9 μm -es szemcsemérettel rendelkezik. A folyamat 6 percet vett igénybe 150 rpm-es fordulat

mellett, az előfeszítés 30 N nagyságú volt. Kenőanyagként a gyártó által előírt DP-Blue nevű szuszpenziót alkalmaztam. Harmadik lépésként a $3\ \mu\text{m}$ szemcseméretű MD-Dac nevű korongot használtam, DP-Blue szuszpenzióval. A lépés 5 percig tart, 20 N-os előfeszítés és 150 rpm-es fordulatszám mellett. Végül az MD-Chem nevű polírozó korongot alkalmaztam, amellyel $0,25\ \mu\text{m}$ -es felület érhető el. A polírozást 2 percen keresztül, 150 rpm-es fordulatszámmal végeztem kenőanyag használata nélkül, 20 N-os előfeszítést alkalmazva. A mintákon a szálak átítatottságát ezt követően 5, 10, 20 és 50-szeres nagyítás mellett vizsgáltam.

A minták töretfelületeit a 16. ábra által szemléltetett JEOL JSM 6380LA pásztázó elektronmikroszkóp segítségével vizsgáltam, elemelve a szálak átítatottságát, a hibahelyeket és a szálak eloszlátottságát.



16. ábra JEOL JEM1010 Pásztázó elektronmikroszkóp [38]

4. A SZÁRNYBEKÖTŐ ELEM ANYAGTECHNOLÓGIAI TERVEZÉSE

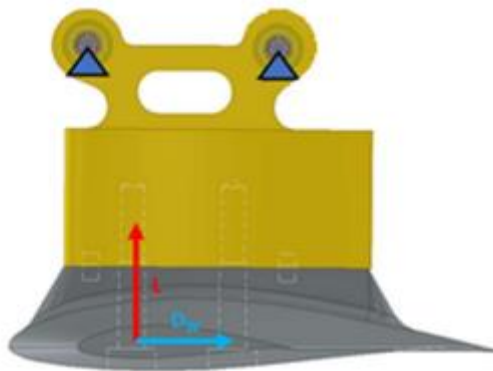
Az irodalomkutatásban vizsgált eljárásokat és gyártási szempontokat mérlegelve, valamint a versenycsapat rendelkezésére álló eszközöket és lehetőségeket figyelembevéve választottam a rövidszálas eljárást, ahol a gyantarendszer és a szálak elkeverése közvetlenül a gyártás előtt történik.

4.1. Szárnybekötő elem szimulációja

A tervezés első lépéseként az alkatrészt érő terhelések pontos meghatározását, végeztem el.

4.1.1. Az alkatrész feladata, terhelések

A terhelőerők meghatározásánál állandó esetet vizsgáltam, ekkor a szárnybekötő elem a pilonhoz és a vezérléshez kapcsolódó része is fix megfogásnak tekinthető. A legnagyobb erők a kiemelkedés előtti időpillanatban ébrednek. Ekkor a hajótest a legnagyobb merülése mellett halad, a szimulációk szerint $5 \frac{m}{s}$ -os sebességgel, így ebben az időpillanatban a legnagyobb az ellenállása. A rendszert ekkor két erő terheli a 17. ábra által szemléltetett módon, a szárnyról átadódó felhajtóerő ($L=1825 \text{ N}$), valamint a haladás közben keletkező ellenállási erő ($D_w=33 \text{ N}$). Mivel utóbbi 2 nagyságrenddel kisebb, így a szimuláció során elhanyagoltam és csak később az inzertezés vizsgálatánál veszem figyelembe.



17. ábra A szárnybekötő elemet terhelő erők és a megfogások

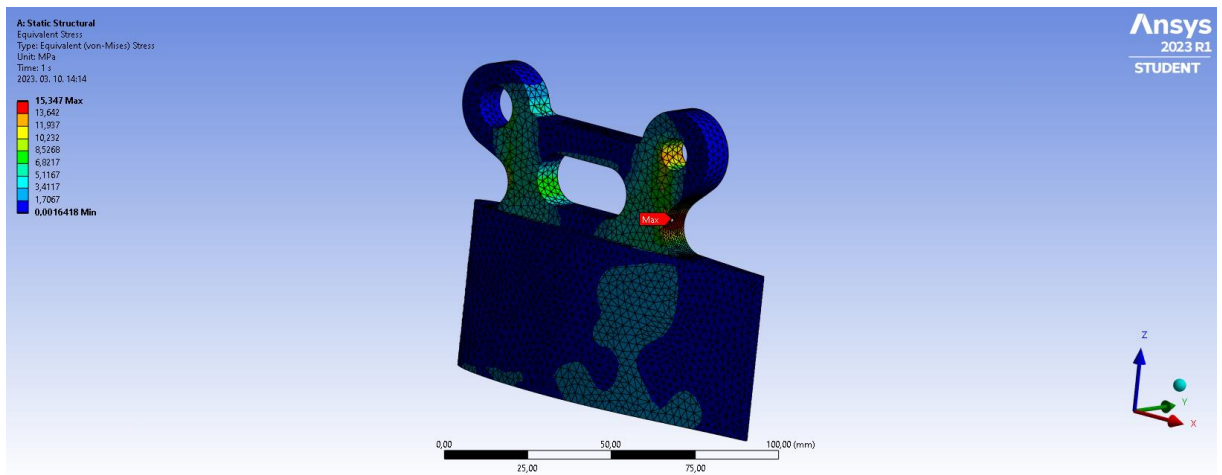
Az alkatrésszel szemben további követelmények merülnek fel, amelyek az alábbiak:

- Méretpontosság
- Jó felületminőség
- Jó megmunkálhatóság (csiszolható, fúrható)
- A használatból fakadó környezeti hatásoknak ellenálló (sós- és édesvíz)
- Több szét- és összeszerelés ciklust kibír (szállítás)
- A víziélővilágot nem szennyezi

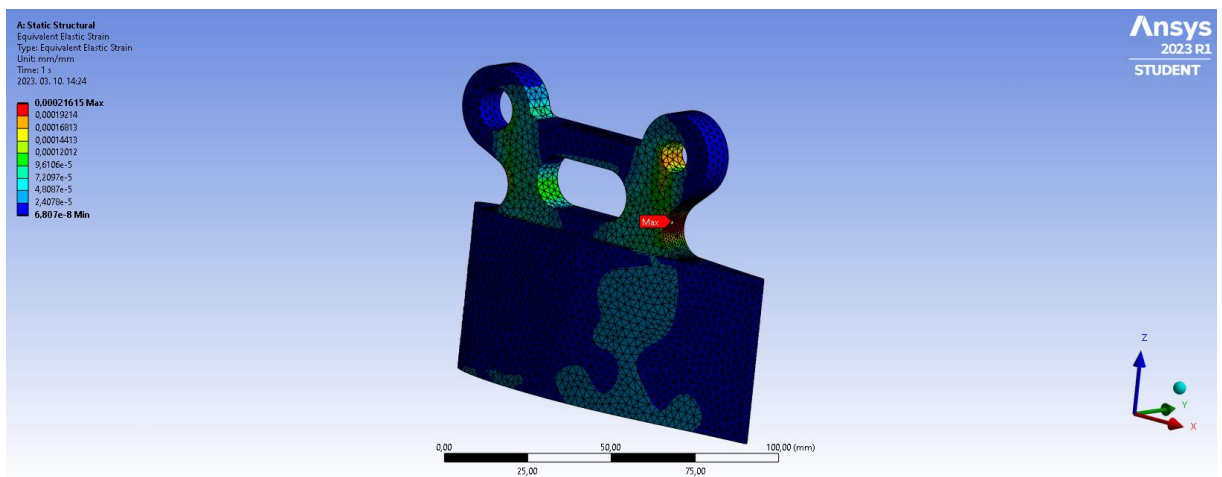
- Tömegcsökkentés az alu alkatrészhez képest
- Alaktartóság
- Fenttarthatóság, újrahasznosítás figyelembevétele
- Esztétikusság

4.1.2. Szimuláció

A szimuláció során a 4.1-es pontban bemutatott elhanyagolásokat tettem. A szimulációhoz az Ansys 2023 R2-es verziójának Static Structural modulját használtam, az alkatrészen tetraéder elemeket alkalmaztam, amit először 2,5 mm-es elemnagysággal futtattam le, majd a második szimulációban a kritikus pontokon 1 mm-es elemnagyságot alkalmaztam, így 51602 elemem adódott.

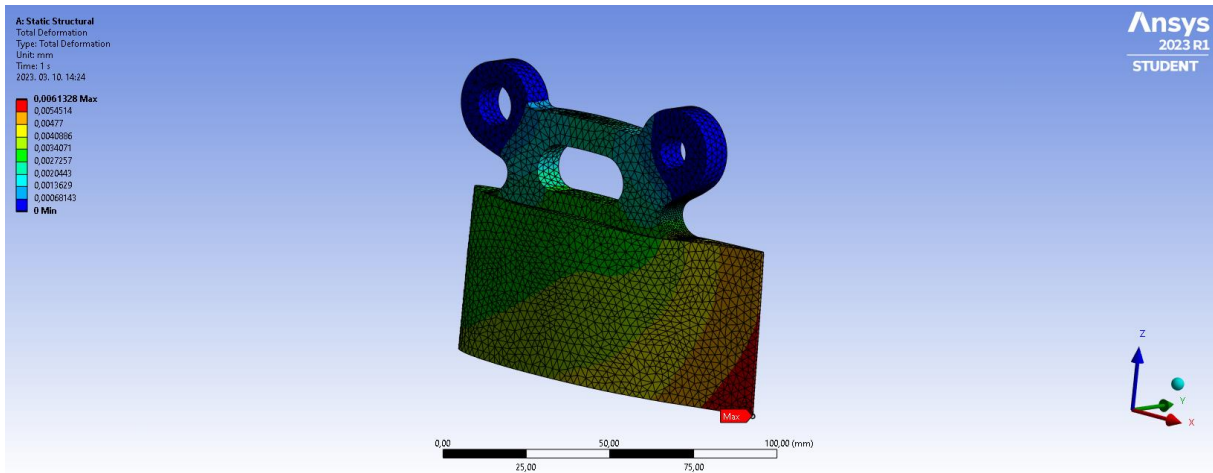


18. ábra Az egyenértékű feszültség



19. ábra Egyenértékű nyúlás

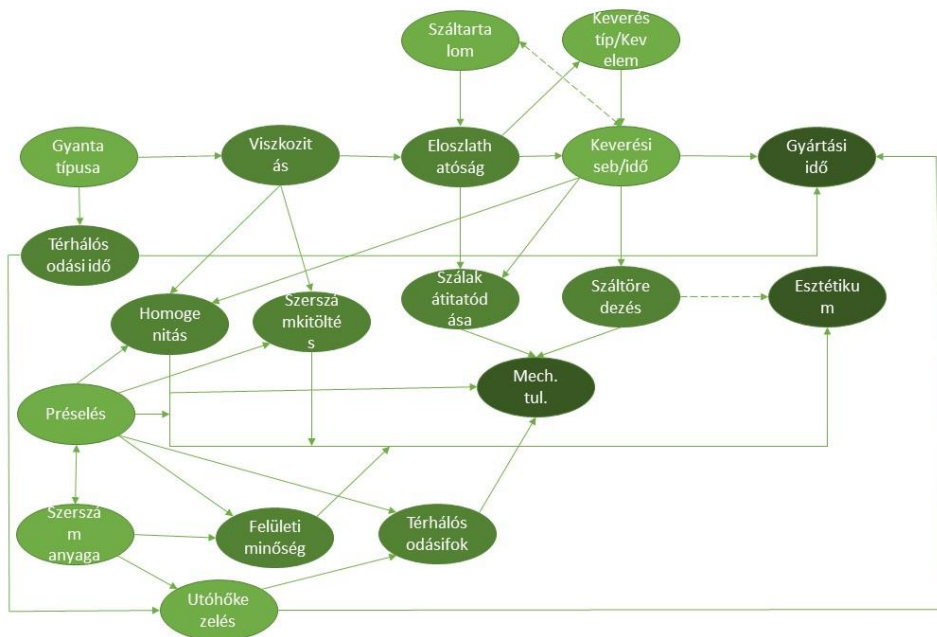
Ez alapján meghatároztam az egyenértékű feszültséget (18. ábra), amelynek legnagyobb értéke 15,347 MPa és nyúlást (19. ábra), amelynek legnagyobb értéke $2,16 \cdot 10^{-4} \frac{mm}{mm}$, valamint a deformációt (20. ábra), amely $6,13 \cdot 10^{-3}$ mm nagyságú.



20. ábra Deformáció $1,3 \cdot 10^3$ -szoros nagyításban

4.2. Anyagfejlesztés

A szimuláció elvégzése után, a pontos igénybevételek ismeretében kezdtem meg a terheléseknek megfelelő anyag fejlesztését. Mivel ez egy összetett folyamat, amelyet több tényező befolyásol, ezért a feladatrész megkezdése előtt döntési mátrixot állítottam fel (21. ábra).



21. ábra A döntési mátrix

A TDK munkám során ezeknek a paramétereknek a megválasztásával kívántam elérni a legmegfelelőbb anyagot a felállított szempontrendszer szerint. A vizsgált minták jelölését az 1. táblázatban foglaltam össze, ahol a főparaméterek is láthatóak.

Minta jele	Szál fajta	Száltartalom (m/m%)	Gyantarendszer	Keverési módszer	Keverési arány	Fazékidő (perc)
A40	új	40%	3010/3124	Kézi	100:33	40
A50	új	50%	3010/3124	Kézi	100:33	40
A60	új	60%	3010/3124	Kézi	100:33	40
B40	új	40%	3016/3124	Kézi	100:40	25
C40	új	40%	3012/3122	Kézi	100:40	100
A40/1	új	40%	3010/3124	Propelleres	100:33	40
A40/2	új	40%	3010/3124	Habarcs keverő	100:33	40

1. táblázat A vizsgált minták jelölése

4.2.1. Száltartalom hatásának vizsgálata

A felállított tényezők alapján elsőként a száltartalom hatását vizsgáltam. Az „A” jelű mintáknál IpoX 3010 jelű A és 3124 jelű B komponenst használtam, kézi keveréssel. A mintákban 40, 50 és 60 tömegszázalék rövidszálat alkalmaztam.



22. ábra Az A60-as minta keveréke

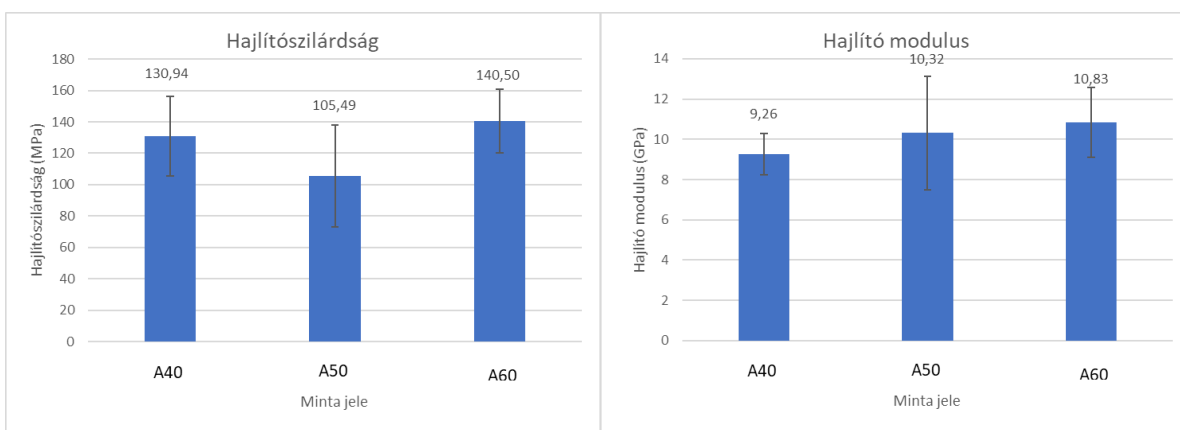
A 60 m%-os minta kézzel kevert premixét a 22. ábra mutatja. Az A60-as mintánál a szálak és a gyanta elkeverése nehézkes volt, lényegesen több időt és erőkifejtést igényelt. Az A50-es és A40-es minta esetében a szálak elkeverése egyszerűbben kivitelezhető volt. Ezt a hatást a szerszámban való elosztásnál is tapasztaltam. Az alumínium szerszámot és a pneumatikus prés etázslapjait a keverés közben 80 °C-ra előmelegítettem. A szálakat a szerszámba a 22. ábra is látható keverő segítségével terítettem el, majd a szerszámfeleket zártam. A pneumatikus présbe helyezés előtt golyóspréssel összeszorítottam a szerszámfeleket, hogy elkerüljem a hirtelen zárás okozta szál kilökődést a szerszámból. A préselést 1,4 bar nyomáson és emelt hőmérsékleten és 40 percig végeztem. Az A40 mintánál fokozottan, az A50-esnél kismértékben, az A60-as esetében pedig egyáltalán nem volt tapasztalható gyanta kifolyás a szerszámból a prés alatt. Az A50-es gyártmány szerszámnyitás követő állapotát a 23. ábra szemlélteti.



23. ábra A50-es gyártmány a szerszámban

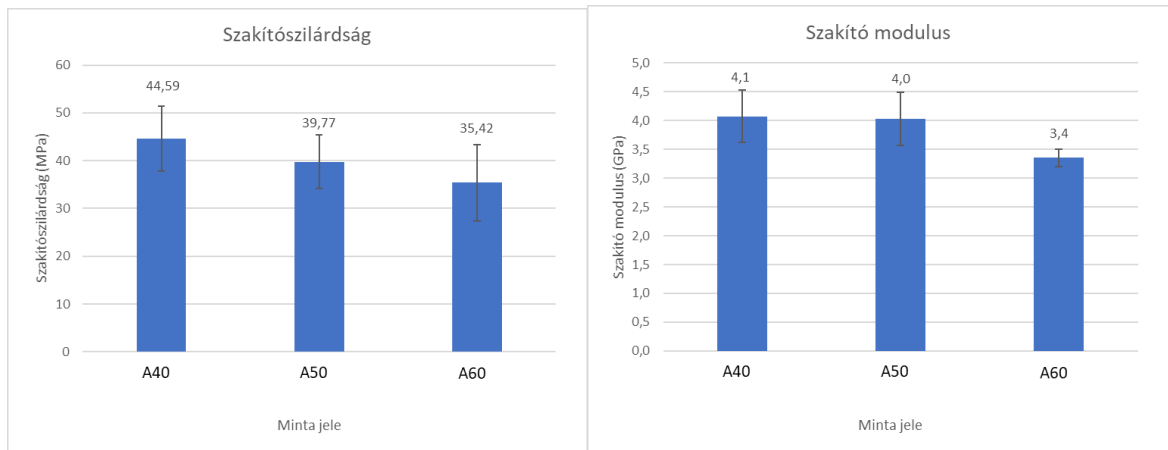
A szerszám szélein megfigyelhető a gyantafolyás jelensége. Ezek miatt a hatások miatt érdemes tényleges száltartalom vizsgálatot folytatni a minták esetében.

A minták előkészítése után hajlító és szakítóvizsgálatot végeztem. A 24. ábra az „A” jelű minták hajlítószilárdságát és modulusát szemlélteti.



24. ábra Az „A” jelű minták hajlítószilárdsága és modulusa

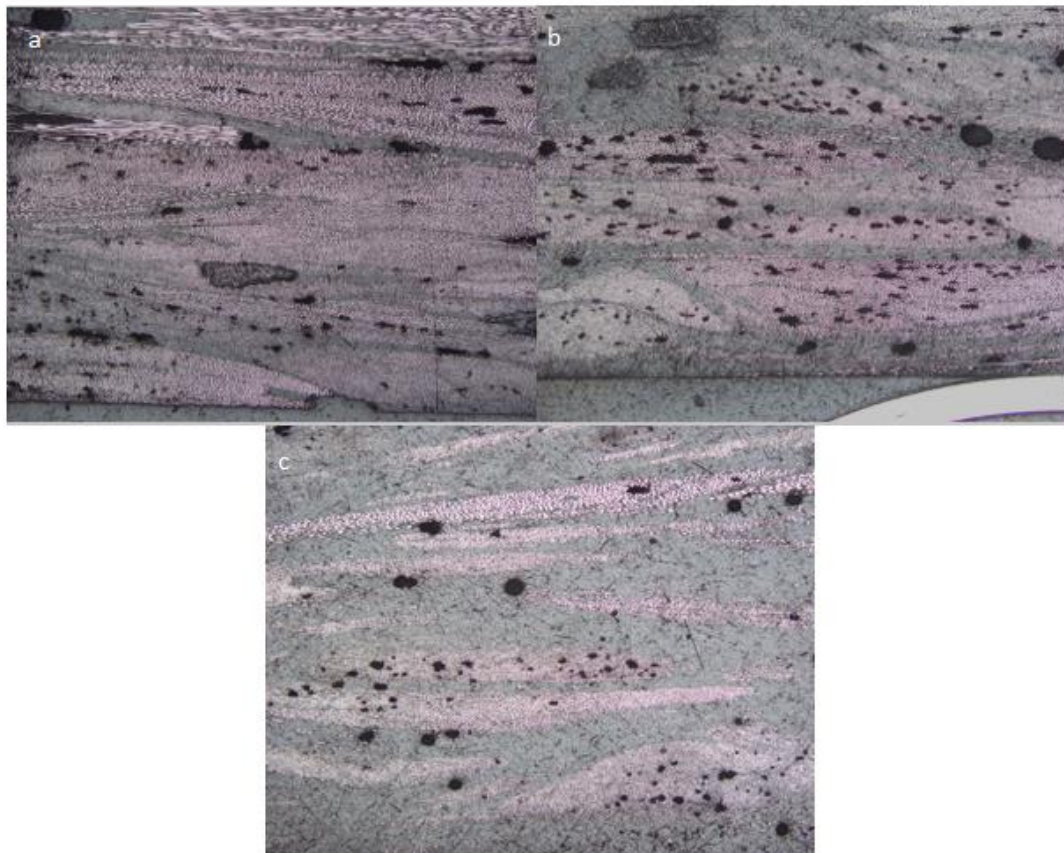
Az eredmények szerint van eltérés a minták hajlítószilárdságában, azonban a szórás tartományok nagyok, és fedik egymást. A 25. ábra az „A” jelű minták szakítószilárdságát és modulusát ábrázolja.



25. ábra Az „A” jelű minták szakítószilárdsága és húzó rugalmassági modulusa

A hajlításnál egyértelműbb eredmények figyelhetők meg. Az A40-es minta rendelkezik a legnagyobb, 44,59 MPa-os eredménnyel, 6,83 MPa szórás mellett. Ezt az A50-es minta követi 39,77 MPa, majd az A60-as 35,42 MPa értékkel, azonban utóbbi kettő szórásmezője jelentős átfedésben van.

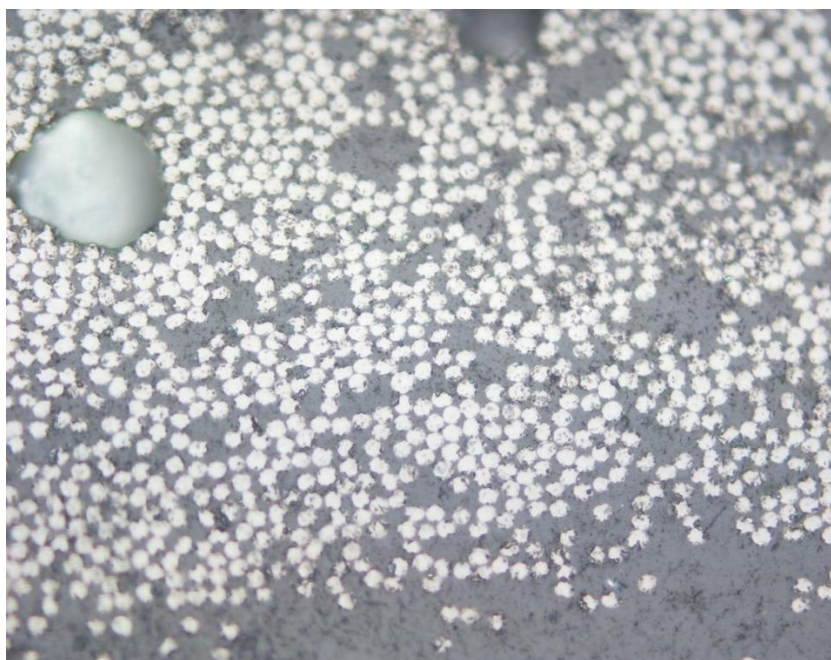
Az optikai vizsgálatok megerősítették, illetve magyarázták a mechanikai vizsgálatok eredményeit. A 26. ábra mutatja az „A” jelű mintasorozat optikai mikroszkóppal, 5-szörös nagyítással készült képeit.



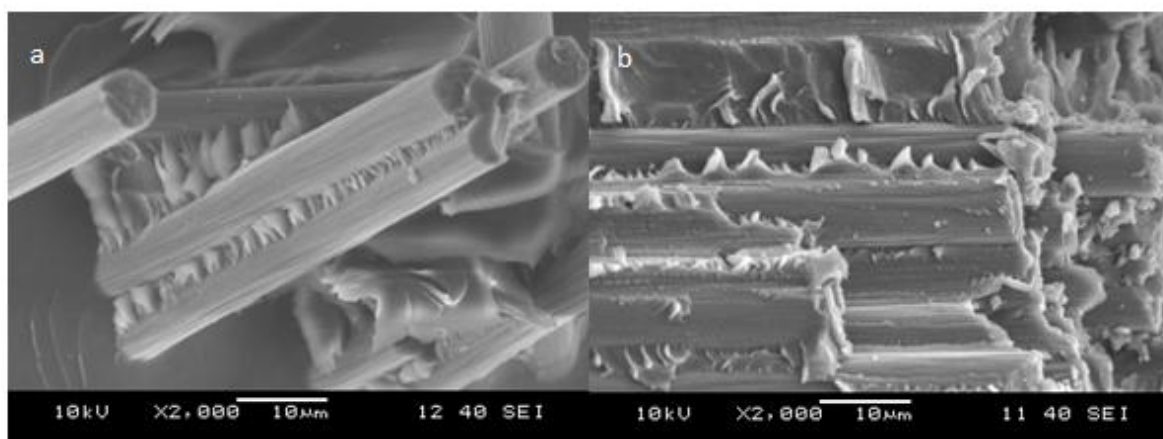
26. ábra Az A60 (a), A50 (b) és A40 (c) jelű minták optikai mikroszkópos képe 5-szörös nagyítással

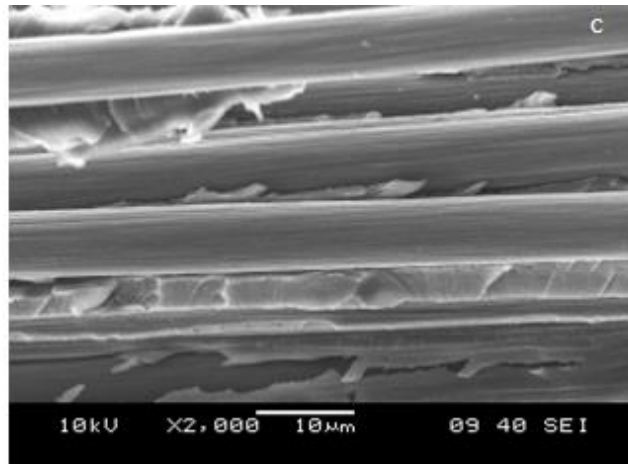
Az ábrán jól kivehető, hogy az egyes, kiinduló szálkötegek nem bomlottak fel, hanem a rovingok egyben maradtak, így ezekben a szálorientáció megegyezik. A 26. ábra jól megfigyelhetőek a hibahelyek, amik a mechanikai vizsgálatoknál megfigyelhető relatív magas szórás tartományt magyarázzák. Ez egyrészt, az elégtelen elkeverésből származik, másrészt a préseléskor is csak részben tudnak távozni ezek a légbuborékok a vákuum hiánya miatt, valamint a szálak orientációja akadályozza az egymáshoz képesti elmozdulást, így a légbuborékok is nagyobb százalékban ragadnak bent a struktúrában. Ennek megoldására kisebb viszkozitású gyanta, valamint eltérő keverési módszer jelenthet megoldást.

Nagyobb, 50-szeres nagyítás mellett (27. ábra), valamint SEM-mel 1000-szeres nagyítás esetén (28. ábra) megfigyelhető, hogy az egyes rovingok szálait is át tudta nedvesíteni az epoxigyanta, itt növekvő száltartalom mellett sem volt számottevő különbség.



27. ábra A40-es minta optikai mikroszkópos képe 50-szeres nagyítással



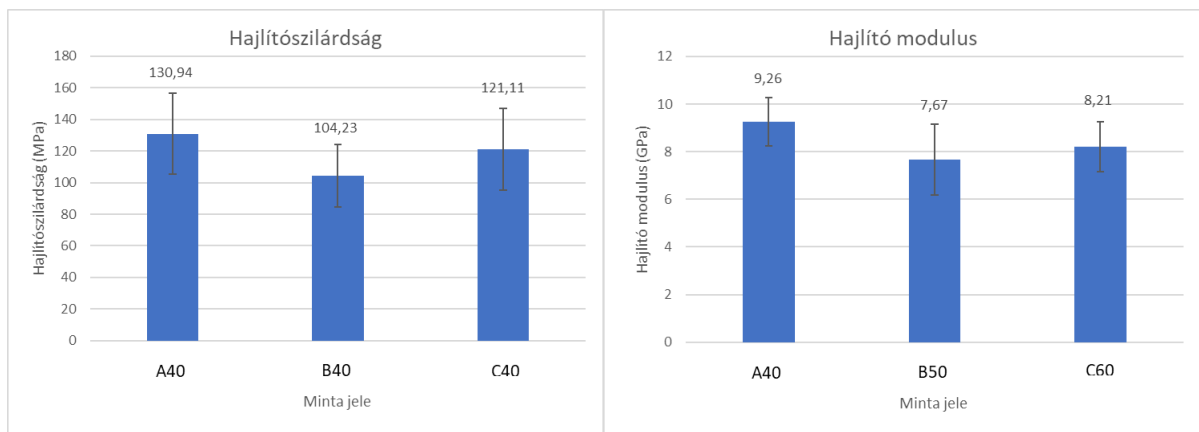


28. ábra Az A40 (a), A50 (b) és A60 (c) jelű minták SEM képei 1000-szeres nagyítás mellett

4.2.2. *Eltérő gyantarendszerek hatásának vizsgálata*

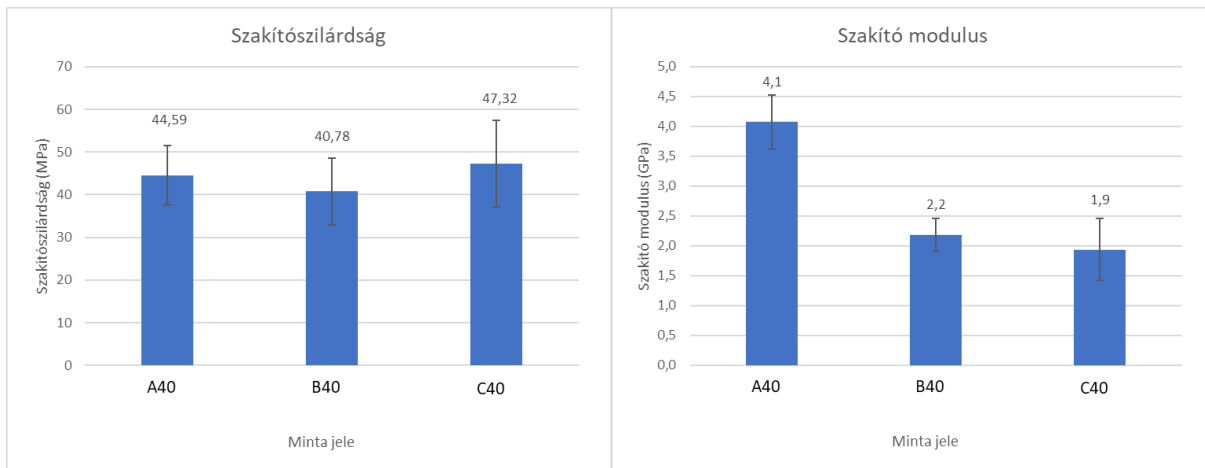
Az előző fejezetben taglalt levegőbuborékok számának és méretének csökkentése érdekében az 1. táblázatban látható B40 és C40 mintákat vettem össze a korábban elkészített A40-es mintával. A keverés során jelentős különbséget a 3 minta esetén nem tapasztaltam. A C40-es minta gyártásakor a korábbiaknál jelentősebb mennyiségű gyanta távozott a szerszámból.

A gyantarendszerek hatása a hajlítószilárdsága és modulusa a 29. ábra szemlélteti.



29. ábra Különböző gyantarendszerek hatása a hajlító szilárdságra és modulusra

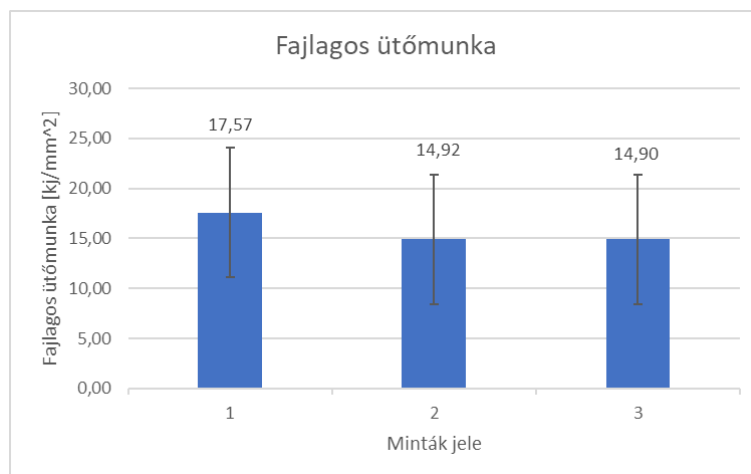
A szakítóvizsgálat eredményeit a 30. ábra foglalja össze. A B40-es minta alacsonyabb, 40,78 MPa-os szakítószilárdságot ért el, míg az A40 és C40-es minták közel azonos, 44,59 és 47,32 MPa-os szakítószilárdsággal rendelkeznek, azonban szórásmezőjük (6,83 MPa és 10,18 MPa) jelentős átfedésben van.



30. ábra Különböző gyantarendszerek hatása a szakítószilárdságra és a modulusra

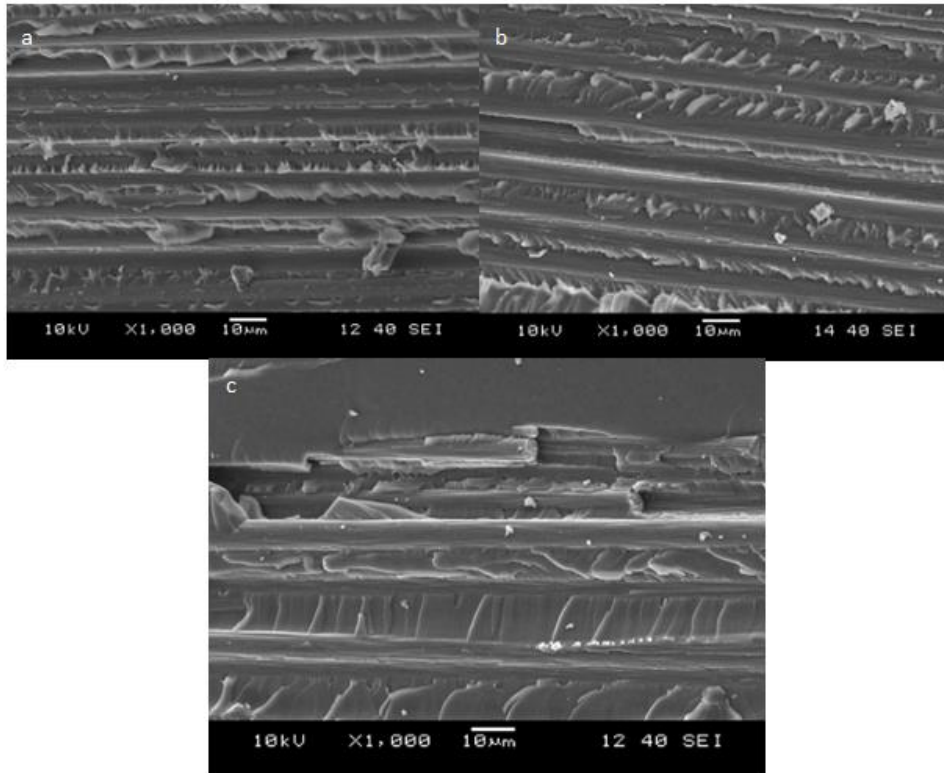
Az A és a B minta szakító- és hajlítószilárdsága kis mértékben tér el egymástól és a szórásmezők jelentős átfedésben vannak, a B minta mindkét mechanikai vizsgálatnál lényegesen rosszabbul teljesített.

A Charpy féle ütővizsgálat eredményeit a 31. ábra mutatja. A fajlagos ütőmunkája az A jelű mintának volt, $17,57 \pm 6,46$ kJ/mm², a B és C minták közel azonos eredményeket, $14,92 \pm 6,78$ kJ/mm² és $14,90 \pm 7,12$ kJ/mm², érték el. A Charpy vizsgálatok során, a struktúra sajátosságából fakadóan voltak minták, amelyek nem a bemetszésnél, hanem más a szálak véletlenszerű orientációjából fakadó gyenge helyen törtek el. Azonban ez a jelenség nem okozott kiugró értékeket sem pozitív, sem negatív irányba.

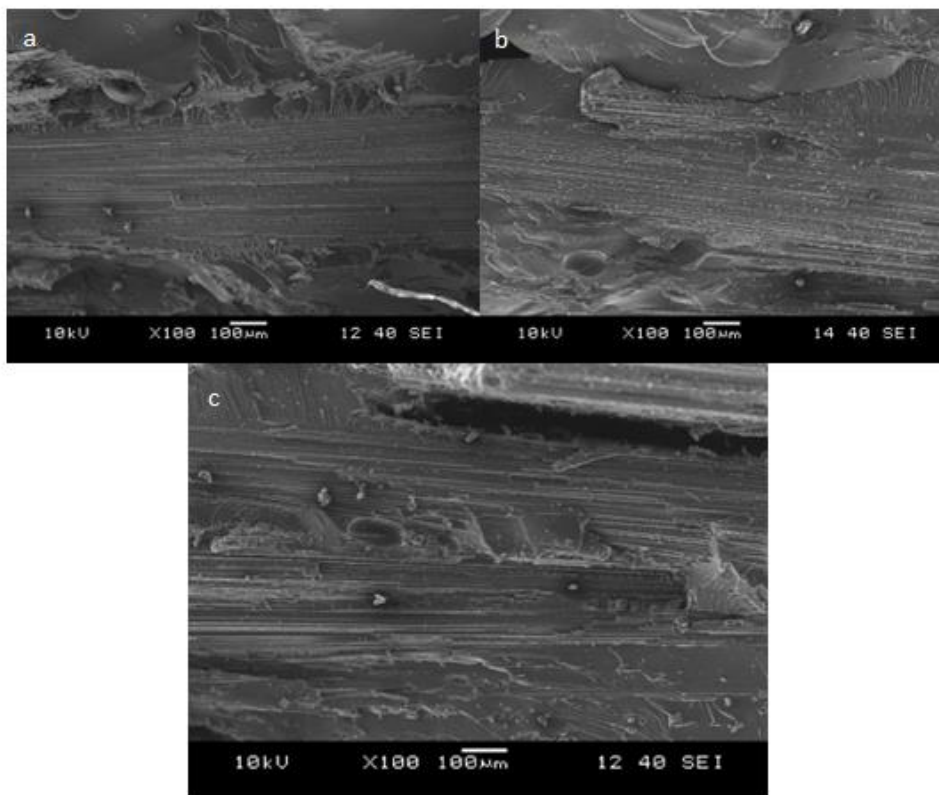


31. ábra A Charpy féle ütővizsgálat

A mechanikai vizsgálatok szélesebb körű megértéséhez a Charpy töretfelületeket pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam. Ezek képeit 1000-szeres nagyítás mellett a 32. ábra mutatja. Ez látható, hogy a 3 különböző gyantarendszer átítató képessége között jelentős eltérés nem tapasztalható, a szálak és a mátrix között mindhárom esetben kiváló adhéziós kapcsolat áll fenn. A magas szórás tartomány okára a 33. ábra ad magyarázatot. A képeken mindhárom esetben jól megfigyelhetőek légzárványok, amik hibahelyként gyengítik a struktúrát.



32. ábra Az A, B, C minták töretfelületeinek SEM képe 1000-szeres nagyításon



33. ábra Az A, B és C minták SEM képe 100-szoros nagyítás mellett

A légzárványok helye és mennyisége jelentős mechanikai tulajdonság változást eredményez. Összefoglalva a különböző gyantarendszerek a légzárványok keletkezésére, valamint az átitatottság mértékére jelentős hatással nem voltak, azonban a mechanikai tulajdonságokat befolyásolták. A B rendszer egy kisebb modulusú és alacsonyabb mechanikai tulajdonságú rendszert eredményezett, azonban a C rendszer a hajlító- és szakítóvizsgálatok eredményeiben az A rendszerrel közel azonos eredményeket produkált. A Charpy vizsgálat során azonban rosszabbul teljesített, így az A rendszerrel haladtam tovább. A fent leírt légzárvány képződés visszaszorítására, így homogénebb szerkezet létrehozására tettem kísérletet a következő lépésben különböző keverők használatával.

4.2.3. *Eltérő keverési módszerek hatásának vizsgálata*

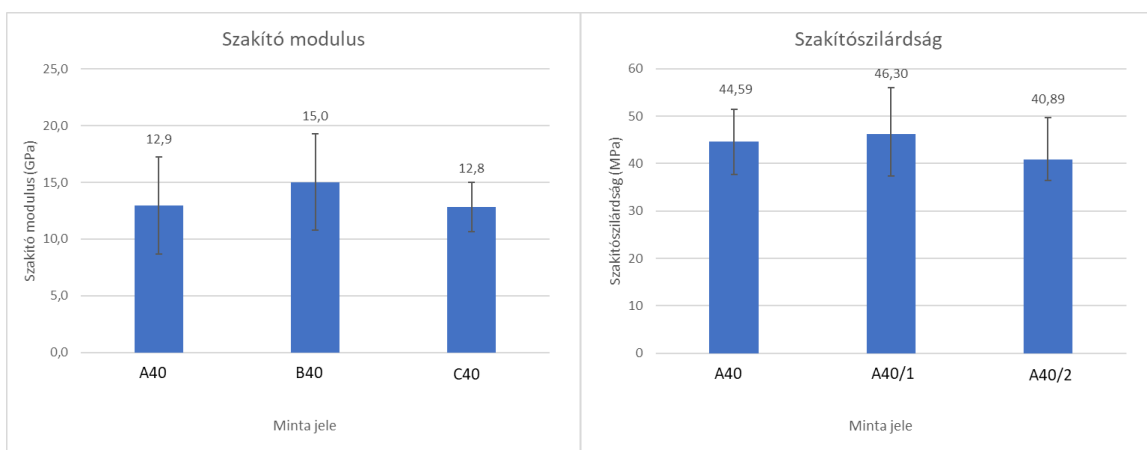
Ebben a fejezetben száras keverőt alkalmaztam 2 eltérő, egy propelleres (A40/1) és egy habarcskeverővel (A40/2), amelyeket a 34. ábra szemléltet. Majd ezek mechanikai tulajdonságait vettem össze korábbi, kézzel kevert A40-es mintával.



34. ábra Száras keverő propelleres szárral (a) és habarcs keverőelem (b)

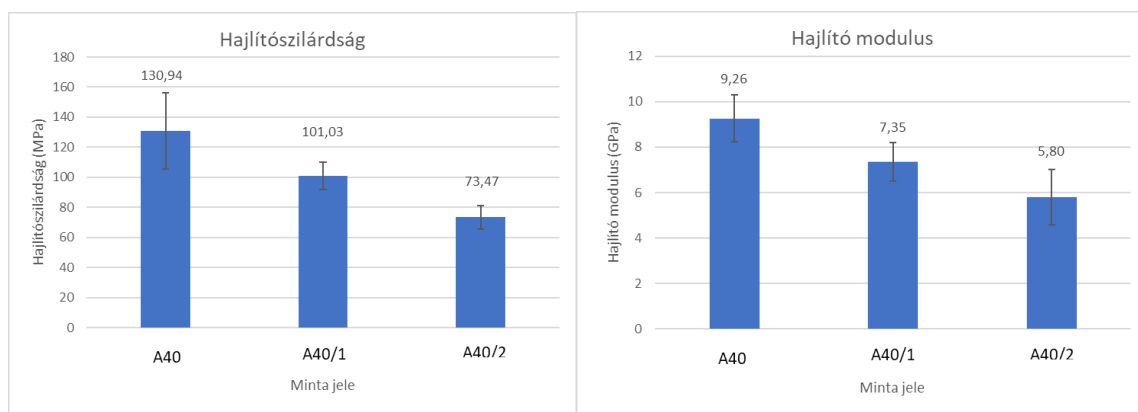
A keverőkkel először a mátrix A és B komponensét kevertem el, majd a szálakat fokozatosan adagoltam a mátrixanyaghoz, a lehető legjobb elkeveredés érdekében. A keverést alacsony fordulatszámon, a gép 2-es fokozatán végeztem 10 percen keresztül. Ezt követően a kézi keverésnél már ismertetett módon vittem fel a szerszámba a keveréket. A keverés során a propelleres keverőnél jelentős problémák nem merültek fel, csupán az edény falára kicsapott szálak visszajuttatásáról kellett gondoskodni. A habarcskeverő alacsony száltartalomnál kitűnően funkcionált, azonban a szálak nagyjából felének adagolását követően, ahogy a keverék egyre inkább paszta jelleget

öltött, a mix beszorult a keverő elem közepébe, ezt keverés közben ezért többször el kellett távolítani és utána folytatódhatott a keverés. Elsőként a szakítóvizsgálatot végeztem el, azonban a korábbi mérésekkel ellentétben a modulus értékeket nem a szakítógörbéből, hanem DIC segítségével végeztem el. A vizsgálat során pontokat jelöltem fel a szakítópróbatesteken, majd ezek egymáshoz képesti elmozdulását videós extenzometérrel mértem és ez alapján határoztam meg a modulus értékeket, ezáltal pontosabb eredményt kapva. A szakítószilárdság és modulus értékeket a 35. ábra mutatja. Az A40 és A40/1 minták szakítószilárdságában ($44,59 \pm 6,83$ MPa és $46,30 \pm 8,88$ MPa) nem tapasztalható jelentős eltérés, és a szórás sávok is közel azonosak. Az A40/2 szakítószilárdsága ($40,89 \pm 4,50$ MPa) némileg elmarad a másik kettőtől, azonban a szórása kisebb. A modulus értéke az A40/1-es mintának a legnagyobb ($15,0 \pm 4,24$ GPa) az A40 és az A40/2 értéke közel megegyezik ($12,9 \pm 4,27$ GPa és $12,8 \pm 2,17$ GPa).



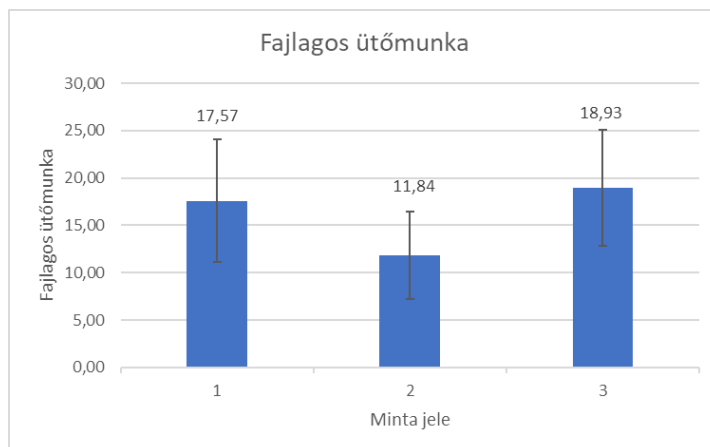
35. ábra Keverőelemek hatása a szakítószilárdságra és a modulusra

A hajlítóvizsgálat eredményeit a 36. ábra szemlélteti. A kézi keveréses minta hajlítószilárdsága ($130,94 \pm 25,43$ MPa) és modulusa ($9,26 \pm 1,02$ GPa) is kiemelkedik a két gépi keveréses eljárás közül, sorrendben: $101,03 \pm 9,11$ MPa és $7,35 \pm 0,85$ GPa, valamint $73,47 \pm 7,90$ MPa és $5,80 \pm 1,20$ GPa.



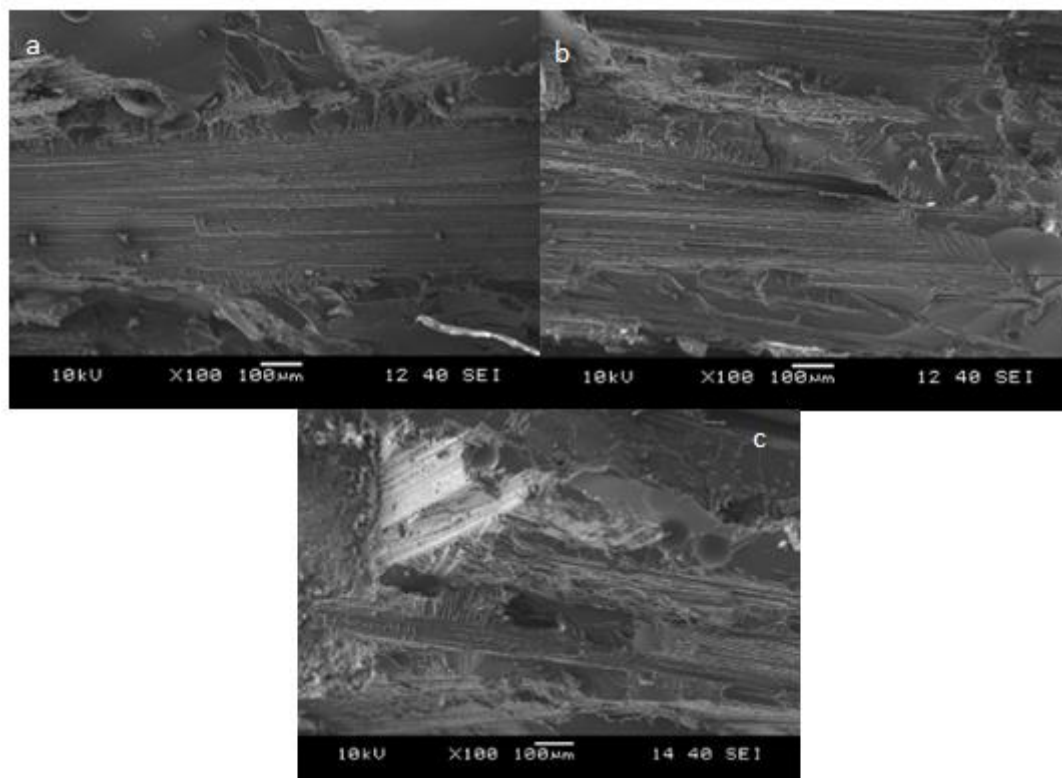
36. ábra Hajlítószilárdság és modulus eltérő keverőelemek esetén

Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a kézi keveréses eljáráshoz képest a géppel kevert minták szórás nagyjából a harmadára csökkent. A Charpy vizsgálatok során (37. ábra) a kézzel kevert mintához képest ($17,57 \pm 6,47 \text{ kJ/mm}^2$) az A40/1 jelentősen csökkent ($11,84 \pm 4,59 \text{ kJ/mm}^2$), míg az A40/2 valamelyest növekedett ($18,93 \pm 6,11 \text{ kJ/mm}^2$).



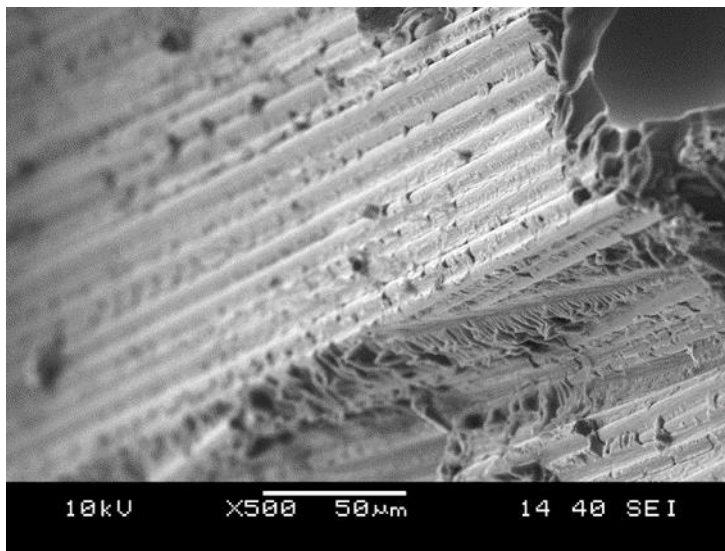
37. ábra Charpy féle ütővizsgálat eredményei eltérő keverőelemek esetén

A kisebb szórások, valamint a hajlító- és Charpy vizsgálat során tapasztalható mechanikai tulajdonság változást részletes megértéséhez SEM vizsgálatot végeztem. A minták képeit 100-szoros nagyítás mellett a 38. ábra szemlélteti.



38. ábra Az A40 (a) A40/1 (b) és A40/2 (c) minták SEM képei 100-szoros nagyításon

Az A40/1-es és A40/2 minta (38. ábra/b és c) esetén a keletkező légzárványok mennyisége, összevetve a kézzel kevert mintához képest csökkent. Az is megfigyelhető ugyanakkor, hogy a gépi keveréses minták esetén a szálkötegek jobban egyben maradtak, ami eredményezheti a hajlítóvizsgálatnál tapasztalható jelentős mechanikai tulajdonságromlást. Ez a jelenség az A40/2 mintánál különösen jelentős, ahogy a 39. ábra is mutatja.



39. ábra Az A40/2-es minta egy jellemző fel nem bomlott kötege

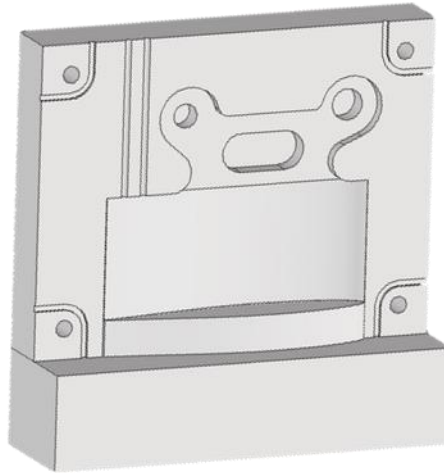
Ebben az esetben a belső szálak teljes átitatottsága sem valósul meg, ami okozhatja a Charpy vizsgálatnál tapasztalt fajlagos ütőmunka növekedését is. Azért, hogy a légzárványok csökkenése és a szálstruktúra szétbomlása is bekövetkezzen egy módosított keverési formát választottam. Ez 3 perc gépi keverést jelent, az 1. jelű propelleres keverővel, majd a szálstruktúrák bontásához 4 perc kézi keverést alkalmazok, végül újabb 3 perc keverés a keverővel.

4.3. Szerszámtervezés

Az anyagfejlesztés után kezdődött el a szerszámtervezés. A komplex geometria, illetve a kis sorozatszám miatt esett a választásom a 3D nyomtatott szerszámra.

4.3.1. Az első prototípus

Az első prototípus modelljét a 40. ábra mutatja be. A szerszám a bonyolult geometria miatt 3 részből áll, a két felsőrész alakítja ki az íves részt és a felső befogást.



40. ábra A szerszám első prototípusa

A nyomtatás során 20%-os kitöltést és 2 réteg 0,2 mm falvastagságot állítottam be. A nyomtatás követően csiszolópapírral értem el a végleges felületminőséget, amelyet P100-P1000 jelű csiszolópapír sorral állítottam be, amellyel $18,3 \mu\text{m}$ -es felület érhető el. A két részt M6-os csavarokkal fogtam össze és ezek köré a gyanta befolyását akadályozó gyanata csatornákat helyeztem, így tettem a szerszám bal oldalán is. A felső szerszámrésznél a befogást feltöltöttem az anyaggal, majd zártam a két felet a csavarokkal és az alsó rész felőli nyíláson a szárnyprofil is feltöltöttem az előkészített anyaggal. Ezt követően a harmadik szerszámfél zárása következett a párhuzamszorítók segítségével. Az első verziót PLA-ból készítettem, ugyanis itt elsősorban a szerszámtervezési hibák feltárása volt az elsődleges célom. Így hőmérséklet növelés nélkül gyártottam, a kívánt nyomást a párhuzamszorítókkal értem el. A tervezés folyamán megválasztott kúposágok (4°) a viszonylag kicsi átmérő és nagy hosszok miatt a felső befogó résznél elégtelennek bizonyultak, így szerszám nyitás után a darab csak a szerszám sérülésével volt eltávolítható. Emellett az alsó szerszám rész szintén sérült nyitáskor, a túl kis kitöltés (infill) használata miatt. A termék azonban a mintát pár felületi hibától eltekintve kiválóan lekövette. A darab jól csiszolható és fúrható, ezért a második prototípusnál a furatokat nem a szerszámban akartam kialakítani, csupán ezek bemérését geometriailag megkönnyíteni.

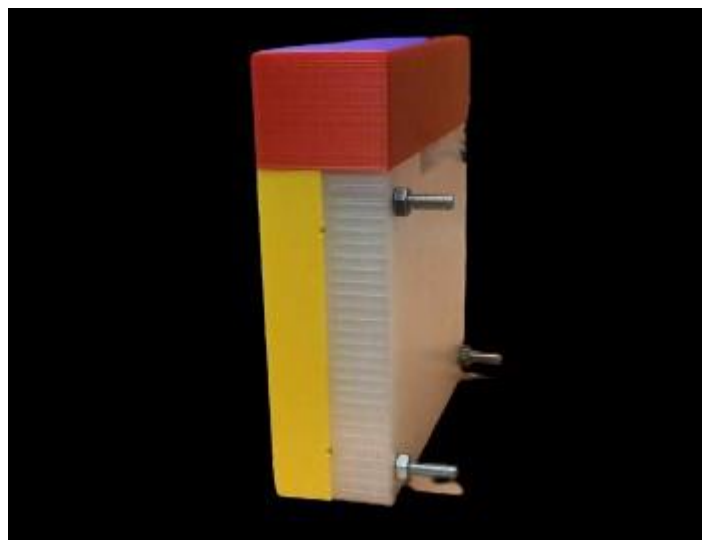
4.3.2. A második szerszám

A második szerszám gyártása során igyekeztem az első koncepció hibáit javítani. A furatok szerszámban való kialakítása helyett csak 2 mm magas furat jelölő geometriát hagytam (41. ábra).



41. ábra A jobb szerszámfél

Ezeknél 20° -os kúposágot és 2 mm-es lekerekítést alkalmaztam. Emellett a korábbi tapasztalatokra támaszkodva az infillt 30%-ra növeltem, valamint a szerszám falát 4 réteg 0,2 mm vastagságú fal alkotta. növeltem a gyantaelvezető csatornák mennyiségét is, aminek következtében jelentősen egyszerűsödött a szerszámnyitás. Az összeállított szerszám képét a 42. ábra szemlélteti.



42. ábra Az összeállított szerszám

A gyártás során az előző pontban ismertetett eljárást alkalmaztam. A szerszám bontás után (43. ábra/a) eltávolítottam a sorja nagyrésztét (43. ábra/b) majd a terméket csiszoltam (43. ábra/c).



43. ábra A termék szerszámbontás utáni (a), szélézési utáni (b) és csiszolás utáni (c) állapota

Ezt követően oszlopos fúró segítségével kialakítottam furatokat és a kikönnnyítést, majd 1 órára 80°C-on térhálósítottam. Befejező lépésként a termék 2 réteg fényes lakkot kapott. A végeredményt a 44. ábra mutatja be.



44. ábra Az elkészült termék

A gyártás során a szerszámkitöltés megfelelő volt, kisebb felületi hibák érzékelhetőek, azonban a lakk réteg ezeket elfedi, strukturális jelentőségük nincsen. A sorja képződés jelentős, ennek a csökkentésén a továbbiakban érdemes dolgozni. Azonban az eljárás összességében alkalmas a műszaki probléma megoldására.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

A TDK dolgozatomban a BME Solarboat Team hajójának a foil rendszerével foglalkoztam. A szárnyrendszer segítségével lecsökkenthető a hajó ellenállása, így növelhető a hatótáv és a végsebesség egyaránt. A rendszer fontos része a szárnybekötő elem, amely a vezérlés és a szárnyak közt teremt kapcsolatot. A belépőél felőli ponton az alkatrész a pilonhoz csatlakozik és csak elforgásra képes, amíg a kilépőél felőli ponton a vezérléshez, itt függőleges elmozdulásra, elforgásra egyaránt képes. A szárnyakhoz inzertek segítségével csavarral kapcsolódik. Felállítottam egy követelményjegyzéket, amely mentén értékeltem az irodalomkutatás során vizsgált lehetséges eljárás módokat. Végül a viszonylag kis ciklusideje, valamint a közel izotrop anyagtulajdonságok miatt a forged carbon eljárásra esett a választásom. Ez az eljárás rövidszálak és a mátrixanyag elkeverésén alapul, ami közvetlenül a gyártás előtt történik meg, ellentétben a BMC-eljárással. Ezt követően a legnagyobb terhelésnek kitett állapotában szimuláltam az alkatrészt, ezzel meghatározva azt a minimális terhelést, amelynek a fejlesztett anyagnak meg kell felelnie. Majd felállítottam egy döntési mátrixot, ahol feltüntettem az állítható paramétereket és azok egymásra gyakorolt hatását. Ez alapján elsőként a száltartalom hatását vizsgáltam. 40, 50 és 60 m% szénszálat alkalmaztam, majd hajlító és szakítóvizsgálatot végeztem és a kapott eredmények értékeléséhez, továbbá a szálak átítatottságának elemzéséhez pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) és fénymikroszkópos vizsgálatot alkalmaztam. Ezután legjobb eredményt elérő 40 tömegszázalékos mintával vizsgálgódtam tovább. Mivel jelentős volt a légzárvány képződés, ezért az eltérő viszkozitású gyanták hatását vizsgáltam erre a paraméterre. Két további mátrix típust vizsgáltam, azonban ezek hatása a mechanikai tulajdonságokra nézve nem jelentett javulást és a légzárvány képződést sem csökkentette érdemben. Emiatt eltérő keverési módszereket alkalmaztam. Ezeknek tudták csökkenteni a légzárvány képződést, ami a minták szórásának csökkenésében mutatkozott meg, azonban a kézikeveréssel ellentétben nem bontották fel annyira a struktúrákat, így egy orientáltabb szerkezet alakult ki, ami a hajlításnál mechanikai tulajdonságcsökkenést eredményezett. A tapasztaltak miatt kombinált keverési eljárást dolgoztam ki. A szárnybekötő elem gyártásához 3D nyomtatott szerszámot terveztem. Az első prototípusban még a szerszámban végleges termék készült volna, azonban a geometriai sajátosságok miatt ez a szerszám sérülése nélkül nem gyártható, ezért itt csak a későbbi lépéseket megkönnyítő geometria kerül kialakításra. Ezt követően csiszolással és fúrással alakítottam ki a végleges terméket. A bekötő elemet utótérhálósítottam és a felület védelme érdekében lakkréteggel láttam el.

5.2. Idegen nyelvű összefoglaló

In my thesis, I dealt with the foil system of the BME Solarboat Team boat. The system can be used to reduce the boat's water resistance, thus increasing both the range and the top speed. An important part of the system is the wing connecting element, which creates a connection between the control system and the wings. At the point on the leading edge, the part is connected to the pylon and can only rotate, while on the point on the exiting edge, it is connected to the control, where it can both move vertically and rotate. It is attached to the wings with screws using inserts. Based on the list of requirements that I set up, I evaluated the possible procedures examined during the literature research. I chose the forged carbon procedure due to its relatively short cycle time and the nearly isotropic material properties. This process is based on the mixing of short fibers and the matrix material, which takes place immediately before production, in contrast to the BMC process. After that, I simulated the component in its state of maximum load, thereby determining the minimum load that the developed material must meet. Then I set up a decision matrix, where I indicated the adjustable parameters and their effect on each other. based on this, I first examined the effect of the fiber content. I used 40, 50 and 60m% carbon fibers, then performed bending and tensile tests and used scanning electron microscopy (SEM) and light microscopy to evaluate the obtained results and to analyze the impregnation of the fibers. I then continued to investigate with the 40 mass percent sample that achieved the best results. Since the formation of air inclusions was significant, I investigated the effect of resins with different viscosities on this parameter. I tested two additional matrix types, but their effect did not improve the mechanical properties and did not significantly reduce the formation of air pockets. For this reason, I used different mixing methods. They were able to reduce the formation of air inclusions, which was shown in the reduction of the standard deviation of the samples. However, in contrast to hand mixing, they did disperse the structures as much, so a more oriented structure was formed, which resulted in a decrease in mechanical properties during bending. Therefore, I developed a combined mixing procedure. I designed a 3D printed tool for the production of the wing connecting element. In the first prototype, the final product would have been made in the tool, however, due to the geometrical peculiarities, this tool cannot be manufactured without damage, so only the geometry that facilitates the subsequent steps is created here. After that, I created the final product by sanding and drilling. I post-cured the connecting element and covered it with a layer of varnish to protect the surface.

5.3. További megoldásra váró feladatok

A jövőben érdemes megvizsgálni, hogy az új szálak alkalmazása helyett visszanyert szálak miként alkalmazhatóak. Ezek előnye, hogy lényegesen kisebb környezeti terheléssel járnak, így az Energy Boat Challenge és a fentarthatóság eszmeiségével egyező, környezetbarát alkatrész hozható létre. Azonban vizsgálni kell, hogy van-e

jelentős mechanikai tulajdonság romlás, valamint kell-e módosítani valamilyen paramétert a gyárthatóságához. Emellett fontos kérdés lehet az is, hogy a szerszámot szabályozott körülmények közt lehessen használni, ezért nagyobb hő és mechanikai terhelés bírású anyag alkalmazása szükséges. Ez egyrészt történhet műszaki anyagok alkalmazásával, a fentiekhez hasonlóan FDM nyomtatással, valamint a kis szériaszámot figyelembevéve alacsony költségű, könnyen CNC marható anyagok is szóba jöhetnek, ilyen lehet az MDF (múfa). Emellett az inzertezés pontos kialakításának vizsgálata is fontos szempont a jövőre nézve.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: Polimer Kompozitok. in A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 398-436. (2007).
2. Sajan S., Selvaraj D. P.: A review on polymer matrix composite materials and their applications. *Materialstoday: Proceedings*, 47, 5493-5498 (2021).
3. Taofik Oladimeji Azeez Thermoplastic Recycling: Properties, Modifications, and Applications. in *Thermosoftening Plastics* (szerk.: Evingür G. A., Pekcan Ö., Achilias D. S.) IntechOpen (2020).
4. Tábi T., Kovács N. K., Czigány T., Hajba S., Kovács J. G.: Comparison of thermal, mechanical and thermomechanical properties of poly(lactic acid) injection-molded into epox-based Rapid Prototyped (PolyJet) and conventional steel mold. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123, 349-361 (2016).
5. Almeshari A., Junaedi H., Baig M., Almajid A.: Development of 3D printing short carbon fiber reinforced polypropylene composite filaments. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 16-26 (2023).
6. <https://www.3djake.hu/filamentek/carbon-filament> (2023.10.14.)
7. <https://www.filanora.eu/index.php?route=product/list&keyword=cf&description=0> (2023.10.14.)
8. Ferreira R. T. L., Amatte I. C., Dutra T. A., Bürger D.: Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*, 124, 88-100 (2017).
9. van de Werken N., Tekinalp H., Khanbolouki P., Ozcan S., Williams A., Tehrani M.: Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective. *Additive Manufacturing*, 31, 100962 (2020).
10. Tóth Cs., Kovács N. K.: Comparison of the accuracy of analytical models for basalt fiber-reinforced poly(lactic acid) composites prepared by injection molding and fused filament fabrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121, 3999-4010 (2022).
11. Cheng P., Peng Y., Li S., Rao Y., Le Duigou A., Wang K., Ahzi S.: 3D printed continuous fiber reinforced composite lightweight structures: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 250, 110450 (2023).
12. Kabir S. M. F., Mathur K., Seyam A. F. M.: A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 232, 111476 (2020).
13. Tian et al.: 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Polymer Composites: Development, Application, and Prospective. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 1, 100016 (2022).
14. Zhuo P., Li S., Ashcroft I. A., Jones I. A.: Continuous fibre composite 3D printing with pultruded carbon/PA6 commingled fibres: Processing and

- mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 221, 109341 (2022).
15. Technology update: compression moulding. *Reinforced Plastics*, 47, 20-21. (2003).
 16. Park C. H., Lee W. I.: Compression molding in polymer matrix composites. in *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites*, Woodhead Publishing, Sawston, 47-94. (2012).
 17. Gandhi U. N., Goris S., Osswald T. A., Song Y. Y.: Special Topic: Compression Molding of Discontinuous Fiber Material. in *Discontinuous Fiber-Reinforced Composites*, Carl Hanser Verlag, München, 371-432. (2020).
 18. BMC injection moulding. *Reinforced Plastics*, 36, 44-48. (1992).
 19. Capela C., Oliveira S. E., Ferreira J. A. M.: Fatigue behavior of short carbon fiber reinforced epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 191-197. (2019).
 20. Diestel O., Hausding J.: Pre-impregnated Textile Semi-finished Products (Prepregs). in *Textile Material for Lightweight Constructions* (szerk.: Cherif C.), Springer, Berlin (2016).
 21. Jabbar M., Nasreen A.: Composite fabrication and joining. in *Composite Solutions for Ballistics*, Woodhead Publishing, Sawston, 177-197. (2021).
 22. Wardale M. W.: Aramid Fiber Reinforced Plastics-Properties. in *Comprehensive Composite Materials* (szerk.: Kelly A., Zweben C. H.), Elsevier, Amszterdam, 199-229. (2000).
 23. Feraboli P., Gasco S., Walde B., Maier S., Masini A., DeOto L.: Lamborghini „Forged Composite” technology for the suspension of the Sesto Elemento. (2011).
 24. https://www.youtube.com/watch?v=25PmqM24HEk&t=783s&ab_channel=EasyCompositesLtd (2023.03.11.)
 25. Zhang J., Chevali V. S., Wang H., Wang C. H.: Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Composites Part B: Engineering*, 193, 108053 (2020).
 26. Ronkay F., Dobrovsky K., Toldy A.: *Műanyagok újrahaznosítása*, Printer Kiadó, Budapest (2014).
 27. Pakdel E., Kashi S., Varley R., Wang X.: Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105340 (2021).
 28. Dauguet M, Mantaux O., Perry N., Zhao Y. F.: Recycling of CFRP for High Value Applications: Effect of Sizing Removal and Environmental Analysis of the SuperCritical Fluid Solvolysis. *Procedia CIRP*, 29, 734-739. (2015).
 29. Sántha Péter: *Újrahaznosított szénszálak kompozitok fejlesztése*. Diploma. BME, Gépészmérnöki kar, Polimertechnika Tanszék (2021).

30. Sántha P., Tamás-Bényei P.: Újrahasznosított szénszálat tartalmazó nyomtatófilament fejlesztése additív gyártástechnológiához. Polimerek, VIII., 361-366 (2022).
31. Gillet A., Mataux O., Pomiers P.: Opportunities of achieving performance composite parts with recycle carbon fibers. in 16th European Conference on Composite Materials, Sevilla, Spanyolország (2014).
32. Turner T. A., Warrior N. A., Pickering S. J.: Re-use of Carbon Fibers in High Value Moulding Compound & Pre-pregs. in 17th International Conference on Composite Materials, Edinburgh, Egyesült Királyság, A3.3 (2009).
33. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=87&l=m> (2023.09.20.)
34. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=27&l=m> (2023.09.20.)
35. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=68&l=m> (2023.09.20.)
36. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=31&l=m> (2023.09.20.)
37. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=20&l=m> (2023.09.20.)
38. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=194&l=m> (2023.09.20.)