



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS –TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TDK DOLGOZAT 2014

SZÁLERŐSÍTETT POLIMER KOMPOZITOK FORGÁCSOLHATÓSÁGI VIZSGÁLATA

GEIER NORBERT

I. évfolyamos MSc hallgató

Konzulens:

DR. MÁTYÁSI GYULA

Egyetemi docens, Gyártástudomány és –technológia Tanszék

2014. november 11.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	2
2. Forgácsolt furat megmunkálási stratégiák és szerszámainak elméleti áttekintése.....	3
2.1. Furat megmunkálási stratégiák és szerszámai –fémekhez-	4
3. Forgácsolt furat megmunkálási stratégiák vizsgálata alumínium ötvözetben.....	9
3.1. Az elvégzett kísérletek bemutatása	9
3.2. Kiértékelés.....	15
4. Szálerősített polimer mátrixú kompozit anyagok jellemzőinek és gyárthatóságának elméleti áttekintése.....	25
4.1. Polimer mátrixú kompozitok a műszaki gyakorlatban.....	25
4.1.1. Polimer mátrixú kompozitok mátrix anyagai.....	26
4.1.2. Polimer mátrixú kompozitok szál-erősítő anyagai.....	27
4.2. Polimer mátrixú kompozitok előgyártása	30
4.3. Polimer mátrixú kompozitok forgácsolása.....	34
5. Szén-szállal egy irányban erősített polimer kompozit forgácsolhatósági vizsgálata	42
5.1. Kísérletterv készítése.....	42
5.2. Előgyártmány készítése a kísérletekhez	44
6. Összefoglalás.....	47
7. Köszönetnyilvánítás	48
8. Irodalomjegyzék.....	49
9. Melléklet jegyzék	51
10. Melléklet.....	52

1. Bevezetés

A gépjármű- és repülőgépipar fejlődésének köszönhetően egyre szélesebb körben elterjedt a polimer kompozitok alkalmazása, fokozatosan megjelent az igény arra, hogy a polimer kompozitok forgácsoló megmunkálását optimalizálják. Tekintve, hogy ezek az anyagok könnyebbek és nagyobb szilárdsággal rendelkeznek, a forgácsoló megmunkálásuk egy sor egyedi problémát és kihívást jelent. A repülőgépiparban a lehető legjobb minőség elérése a cél, a termelékenység növelése csak másodlagos szempont. Ezt folyamatos folyamatellenőrzéssel érik el, hiszen a polimer kompozitok forgácsolhatóság elmélete és gyakorlata napjainkban még nem teljesen kidolgozott.

A TDK munkám elsődleges célja volt, hogy a nemzetközi irodalomkutatás során szerzett információk alapján összeállítsak egy kísérlettervet az egy irányban szálerősített polimer kompozitok forgácsolhatóságának vizsgálatához.

A TDK munkám első részében alumínium ötvözet forgácsolhatósági jellemzőit vizsgáltam, hogy később összehasonlítási bázisként tudjam használni a polimer kompozit megmunkálás jellemzőinek kiértékeléséhez. A kísérlettervezés után alumínium ötvözetbe készítettem átmenő furatokat, különböző megmunkálási stratégiákkal. A fúrás során keletkező forgácsoló erőt egy háromkomponenses Kistler erőmérő cellával mértem, majd kiértékeltem. A furatok palástfelületi érdességét, a furat alakhibáit megmértem, a fúrás során keletkezett sorját a be- és kilépő felületeken elemeztem.

A TDK dolgozat második részében áttekintettem a polimer kompozitok forgácsolhatóságára vonatkozó nemzetközi szakirodalmat, és összeállítottam egy kísérlettervet, ami alapján a kutatás következő fázisában vizsgálni tudom az egy irányban szálerősített polimer kompozit forgácsolt megmunkálás során jelentkező tipikus problémák okait és megoldási lehetőségeit.

A TDK dolgozatom eredményeképp elkészült egy „Különböző furat megmunkálási stratégiák” c. egyetemi laboratóriumi gyakorlat bázisanyaga, illetve egy kísérletterv az egy irányban szálerősített polimer kompozitok vizsgálatára.

2. Forgácsolt furat megmunkálási stratégiák és szerszámainak elméleti áttekintése

Első körön ismertetek néhány alapfogalmat, majd a TDK céljaihoz arányosan részletezem az egyes szerszámokat és stratégiákat.

A fúrás és a furatbővítés olyan határozott él geometriájú forgácsolási¹ eljárás, amelyben a forgácsoló fő és mellékmozgásokat a munkadarab és a szerszám is végezheti. Függőleges megmunkáló központon jellemzően a fő és mellékmozgást is a szerszám végzi.^[13] A továbbiakban csak függőleges megmunkáló központon gyártható furatokról és stratégiákról fogok írni. A furatokat technológiai szempontból átmérőjük (D) és hosszúságuk (L) alapján négy csoportba sorolhatjuk: [14]

- Rövid furat , ha: $L/D \leq 0,5$
- Normál furat , ha: $0,5 < L/D \leq 3$
- Hosszú furat , ha: $3 < L/D \leq 10$
- Mély furat , ha: $10 < L/D$

A TDK dolgozatomban a *normál furatok* stratégiáit elemzem. A mély furatokhoz speciális szerszámok használata célszerű², míg a többi típus jellegzetes furatmegmunkáló szerszáma a csigafúró és a szármaró.

A furatok megmunkálásának két jellegzetes lépése van: a fúrás és a furatbővítés. Fúrás az a munkafolyamat, amikor tömör anyagba készítünk furatot, furatbővítés pedig az, amikor a már meglévő furatot nagyobb átmérőjű furattá munkálják meg. [14] Orbitális fúrásként nevezi a nemzetközi szakirodalom azt a metódust, amikor egy szármaróval csavarvonal interpolációval készítjük el a furatot.

Valamely fúrási metódus során elkészült furat minőségét jellemezhetjük:

- Az alaktűrésével (körkörösség, hengeresség),
- Helyzettűréssel (merőlegesség, pozíció),
- Mérettűrésével (pl.: Ø20H7; Ø20±0.009)
- Palástfelületi érdességgel (Ra, Rz, stb.),
- Belépő és kilépő éleken a sorja képződésével, a keletkezett forgáccsal,
- Egyéb (hőmérséklet, energiaigény, forgácsolási erő stb.).

¹ Furatot nem csak forgácsolással lehet létrehozni (termikus vágások, vízvágás, szikraforgácsolás stb.), de ebben a TDK dolgozatban csak a forgácsolt furatmegmunkálással foglalkozom.

² Euler féle kihajlás miatt.

Az elkészült furat minőségét befolyásolja:

- Az MKGS³ rendszer elemeinek jósága (pontosság, merevség, hővezetés, sajátfrekvencia, kopottság, dinamikus tulajdonságok stb.)
- A technológiai paraméterek (előtolás, forgácsolási sebesség, mozgáspálya⁴)
- A hűtő-kenő módszer (elárasztásos, belső hűtés, minimál kenés, száraz stb.)
- A hűtő-kenő folyadék fajtája (olajköd, emulzió, levegő stb.)
- Egyéb (hőmérséklet, páratartalom, egyéb sztochasztikus külső hatások)

2.1. Furat megmunkálási stratégiák és szerszámai –fémekhez-

Központfúrás

Központfúrásra általában két esetben van szükség. Az egyik, amikor a munkadarabot később csúcsok közé szeretnénk befogni. Ezekre a furatokra rendszerint nagyon szigorú méret-, alak- és helyzettűrések vonatkoznak, hiszen ezen a kúpfelületen tájolódik a munkadarab csúcsok közé fogáskor. A további megmunkálások pontosságára nagyon nagy hatással van. [14]

Másik jellemző esete a központfúrásnak a startfurat készítése. Ha egy karcsú fúróval szeretnénk furatot készíteni, akkor startfuratból indítjuk a megmunkálást. A startfuratnak minimálisan olyan mélynek kell lennie, hogy megvezesse a fúrót. Ezzel minimalizálhatjuk a karcsú fúró kihajlása miatt keletkező merőlegességi és pozíció hibákat.

A felsorolt két jellegzetes alkalmazásból látható, hogy a központfúrónak rövidnek és merevnek kell lennie, hogy a kihajlása, ütése és a pontatlansága minimális legyen. Központfúró szerszámokat láthatunk a 2.1. ábrán.



2.1. ábra
Központfúrók
Rádiuszos szerszám felül, 60°-os szerszám alul [14]

³ MKGS: Munkadarab Készülék Gép Szerszám

⁴ A mozgáspálya változtatása származóval (x,y,z) ben lehetséges, csigafúrónál csak z tengely mentén.

Telibe fúrás

A telibe fúrás leggyakrabban használt szerszáma a csigafúró. A forgácsoló szerszám dolgozó részén lévő két csavarvonalú horony feladata a fúráskor keletkezett forgács elvezetése és a hűtő-kenőanyag vágó élekhez vezetése. A két fő vágó él, melyet a forgácshorony homloklapja és hátlapja képez, végzi a forgácsolást. [15] A csigafúrók jellegzetes geometriai kialakításait a 2.2. ábra foglalja össze.

Jelölés	A fúró kialakítása	Alkalmazási terület	Forgácsolható anyagok	Csúcs-szög
N		Átlagosan forgácsolható szerkezeti anyagok	Acél, acélöntvény 700 N/mm ² szakítószilárdságig	118°
			rézötvözetek	140°
H		Kemény, rideg szerkezeti anyagok	Szívós rézötvözetek	118°
			Nagy szilárdságú acél	140°
			Közetek	150°
W		Lágy szerkezeti anyagok	Alumínium, réz	128-135°
			Horganyötvözet	118°

2.1. ábra
Csigafúró szerszámok csoportosítása [16]

A hagyományos csigafúróval való fúrás során beszélni kell a be- és kilépési jelenségekről, amik befolyásolják többek között a szerszám éltartamot és a furat minőségét is. Ezek a jelenségek az MKGS rendszer rugalmasságából és a szerszám kereszt éle miatt alakulnak ki. A fúrás kezdetekor a kereszt él „nyomja” a munkadarabot, mert a fő forgácsoló élek még nem értek munkadarabot, még nem képesek forgácsolni. Az ebből adódó axiális erőnövekedés során keletkező eseményt nevezzük belépési jelenségnek. Amikor a kereszt él kilép a munkadarabból, akkor ez az erő hirtelen lecsökken, az MKGS rugalmas mivolta miatt visszarugózik a rendszer, ezért az előtolás megnövekszik (*rúg egyet*). A visszarugózáskor keletkező előtolás növekedést nevezzük kilépési jelenségnek.



2.2. ábra
Csigafúró szerszámok csúcs közeli kialakításai: 1) tömör 2) betétes 3) lapkás [17]

A 2.2 ábrán látható a csigafúrók leggyakoribb él kialakításait. A bal szélső egy bevonatolt, tömör keményfém csigafúró, belső hűtéssel, a középső szerszám éle cserélhető, míg a jobb szélső egy lapkás fúró.

A telibe fúrást lehet még alakos kiesztergáló szerszámmal (2.3. ábra), hosszlyukmaróval (2.4. ábra) és sok más szerszámmal készíteni.



2.3. ábra
Alakos kiesztergáló fej^[16]



2.4. ábra
Hosszlyukmaró^[16]

Furatbővítés

Furatbővítésre jellemzően két esetben van szükség. Az egyik esetben telibe fúrással nem tudjuk egy fúrással létrehozni a furatot a forgácsolás során keletkező nagy nyomatókigény, vagy szerszám geometriai korlátok miatt. Ekkor az elő furatot (amit telibe fúrással alakítottunk ki) felfúrjuk. A másik eset, amikor képesek lennénk kifúrni a furatot, de nem tudjuk tartani az előírt pontosságot. Ekkor előfúrjuk a furatot, és furatbővítéssel „lesimítjuk” a palástfelületet. A furatbővítés jellemző szerszámai megegyeznek a telibe fúró szerszámokkal.

Orbitális fúrás

Amíg hagyományos csigafúróval az IT9 –es pontosságot csak nehezen tudjuk elérni⁵, addig csavarvonal interpolációval megfelelő technológiai paraméterekkel a furat minősége IT6-os is lehet. Az orbitális telibe fúrás jellemzően hosszabb ideig tart, mint csigafúróval, de szűkebb alak- helyzet- és mérettűrések érhetőek el. Az orbitális fúrás jellemző szerszáma a szármaró. (2.5. ábra)

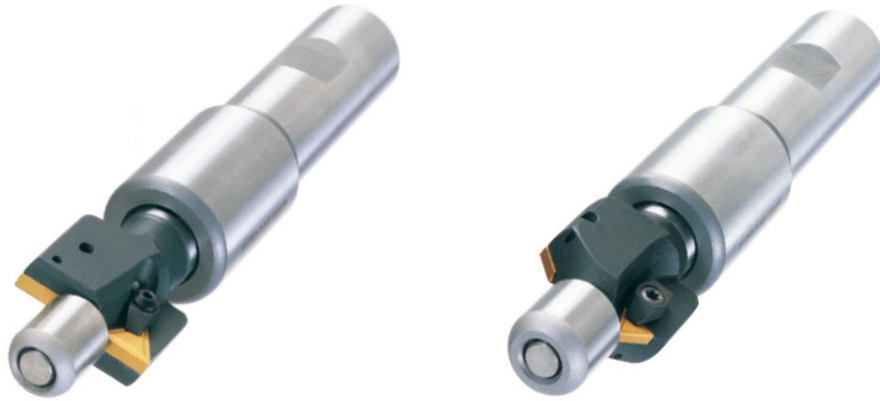


2.5. ábra
Szármaró [16]

⁵ Pontos befogás (pl.: hidraulikus), merev MKGS rendszer, megfelelő technológiai paraméterek esetén.

Süllyesztés

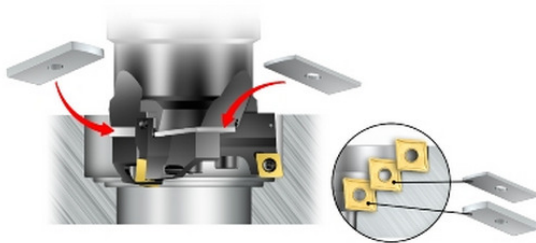
A süllyesztés célja egy meglévő furat bővítése, illetve alakjának megváltoztatása. Klasszikus esetben egy csigafúróval előfúrt furatot bővítünk, ezért a süllyesztők egy csoportjának van megvezető csonkja (*nem forgácsol*). Tipikus lapkás süllyesztő szerszámok láthatóak a 2.6 ábrán.



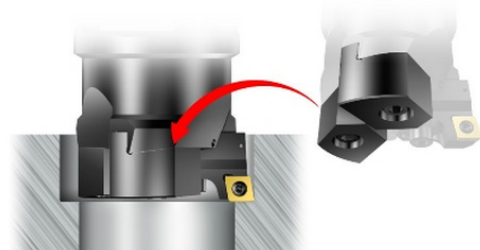
2.6. ábra
Lapkás süllyesztő szerszámok [19]

Kiesztergálás

A kiesztergálás egy meglévő furat átmérőjének növelésére vagy minőségének javítására szolgáló forgácsoló eljárás. Kiesztergálással az előfúrt furat minden geometriai jellemzője (helyzet, alak, méret, érdesség) javítható. Jellemzően két esetét különböztetjük meg: a lépcsős (2.7. ábra) és az egyélű (2.8. ábra) furatesztergálást.



2.7. ábra
Lépcsős kiesztergáló szerszám [17]



2.8. ábra
Egyélű kiesztergáló szerszám [17]

Dörzsárazás

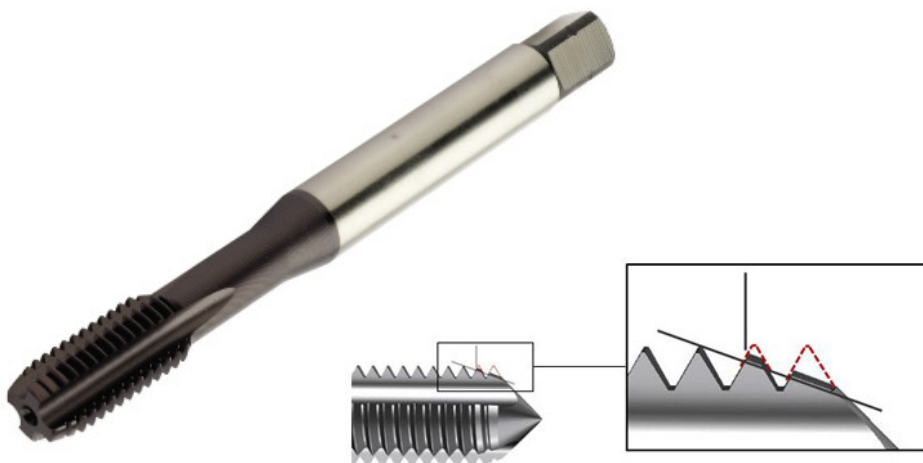
Akkor használunk dörzsárat, amikor a meglévő furat felületi érdességét vagy a mérettűrését szeretnénk csökkenteni. Dörzsárazással IT6-os furatokat is tudunk készteni. A dörzsárazással csak a geometriai tűrést tudjuk javítani, az alak- és helyzethibákat viszont nem. A 2.9. ábrán látható egy $\varnothing 10h7$ –es dörzsár.



2.9. ábra
 $\varnothing 10h7$ dörzsár [19]

Menetfúrás

A furat menetmegmunkálás egyik lehetősége a menetfúrás. A gépi menetfúró szerszámot (2.10. ábra) jellemzően egyszerűbb alkatrészek gyártásánál használják, mert ha beletörik a szerszám a munkadarabba, akkor azt körülményes onnan kivenni. A menetfúrás előtt elő kell készíteni magátmérőre a cél furatot valamilyen furatkészítő eljárással, majd a furat éleit szabvány szerinti értékkel letörni (*konstrukciós, technológiai és esztétikai szempontok miatt*). Menetfúrásnál a forgó és az előtoló mozgás között kapcsolat valósul meg a szerszám oldalról. Amennyiben ezt a kapcsolatot a szerszámgép vezérlése kezelni tudja, azaz olyan az irányítástechnikája, hogy szabályozni tudja a főorsó fordulatszámát az előtolás negatív visszacsatolásával, akkor mereven be lehet fogni a menetfúrót. Amennyiben a szerszámgép vezérlés nem tudja a kapcsolatot létrehozni, és szabályozni, abban az esetben a menetfúrót egy (axiális irányban) rugalmas befogóval kell befogni, hogy a menetfúró által „diktált” előtoló mozgás és a vezérelt előtoló mozgás közti különbség miatt ne törjön el a szerszám.[20]



2.10. ábra
Gépi menetfúró szerszám [19]

3. Forgácsolt furat megmunkálási stratégiák vizsgálata alumínium ötvözetben

Az előző fejezetben bemutattam néhány forgácsolt furat megmunkálási lehetőséget és szerszámot. A TDK munkához kapcsolódóan elkészítettem egy kísérlettervet, majd elvégeztem a kísérleteket a normál mérettartományba eső (lásd: *furatok csoportosítása*) furatok megmunkálásával kapcsolatban. A kísérletek során négy különböző szerszámmal végeztem 5083 anyagjelű alumínium ötvözetbe fúrási kísérleteket. A szerszám átmérők azonosak voltak, így az elkészült furatok alapján összehasonlíthatóak az egyes fúrási stratégiák. A kísérleteknek és a kiértékelésüknek két fő célja volt:

- A repülőgépiparból fokozatosan kiszoruló alumínium ötvözet forgácsolhatóságát bázisként felhasználni a kiszorító anyagok, a szálerősített polimer kompozitok forgácsolhatósági vizsgálatához.
- Egyetemi oktatási tananyag készítése és fejlesztése. Laboratóriumi gyakorlat elméleti hátterének megalapozása.

3.1. Az elvégzett kísérletek bemutatása

A kísérleteket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem „G” épületében található 3 tengelyes Kondia B640 típusú CNC marógépen végeztem el. A furatok geometriai jellemzőit szintén a „G” épületben, a klimatizált mérés technika laboratóriumban mértem. A kísérleteket és a kiértékeléseket a következő lépésekben hajtottam végre:

1. Kísérleti előkészítés (kísérletterv, szerszámok, befogók, erőmérő, paraméteres CNC program stb.)
2. Fúrások erőméréssel
3. 3D koordináta mérőgéppel geometriai jellemzők felvétele
4. Mikroszkóppal sorja vizsgálat (*be és kilépő éleken*)
5. Marógépen a munkadarab előkészítése érdesség méréshez
6. Érdesség mérés furat palástfelületen
7. Mikroszkóppal furat palástfelület vizsgálata
8. A mért eredmények kiértékelése

A következőkben, ebben a sorrendben részletezem a kísérlet egyes fázisait. A részletezés során kitérek az alkalmazott szerszámokra, gépekre, készülékekre, műszerekre, mérési és kiértékelési módszerekre.

Kísérleti előkészítés

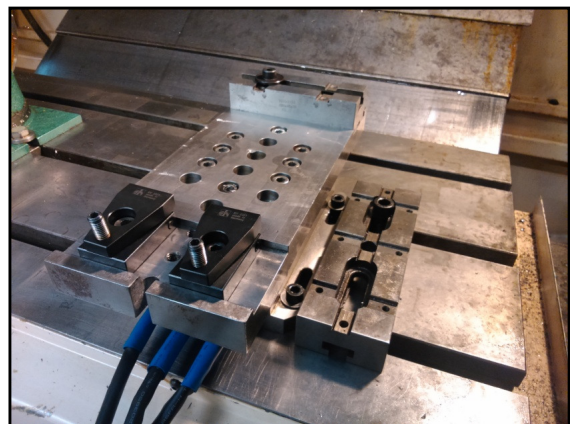
A kísérletek megkezdése előtt számos előkészületi tevékenységet kellett véghezvinnem. Első lépésként előállítottam a rendelkezésre álló erőforrások, eszközök és a nemzetközi irodalomból vett információk [21][22] alapján a kísérlettervet, ami a 2. és 3. sz. *mellékletekben* található. A kísérletek során különböző szerszámokkal, különböző előtolás és forgácsolási sebességekkel készítettem furatokat. A vizsgálatok során az egyes szerszámok előtolás és forgácsolási sebességének változtatásának hatására bekövetkező forgácsolhatósági jellemzők változását vizsgáltam (alakhibák, felületi érdességek, sorja képződés). További lépések voltak a szerszámok, szerszámbefogók kiválasztása, beállítása, az előgyártmány előállítása, erőmérő cella kalibrálása, CNC programozás.

A kísérletek a 3.1. ábrán látható szerszámgép környezetben folytak le. A 3.2. ábrán látható a Kistler 9257BA típusú erőmérő cella, és a rá szerelt készülék, amibe a munkadarabot helyeztem (11. sz. *melléklet*). A furatok elhelyezkedését az előgyártmányon 3D-s CAD szoftverrel optimalizáltam. Az erőmérő cellából kijövő digitális jelet egy erősítővel erősítettük, majd egy PC-n futó szoftver segítségével (*Dyno Ware*) gyűjtöttük az adatokat. Az alkalmazott szerszámok a következők voltak:

- Ø12,5, 3 élű keményfém csigafúró, B105A12500 K10 jelölés (Kennametal)
- Ø12,5, Bevonat nélküli lapos csigafúró ($K=180^\circ$), B707A12500FBS (Kennametal)
- Ø12,5, 4 élű egyenes hornyú fúró, B411A12500KF1 jelölés (Kennametal)
- Ø10, 2 élű, 45° spirálszögű szármaró, K30F anyagminőséggel
- Ø10, 2 élű csigafúró előfúráshoz, K10



3.1. ábra
Kondia B640 szerszámgép

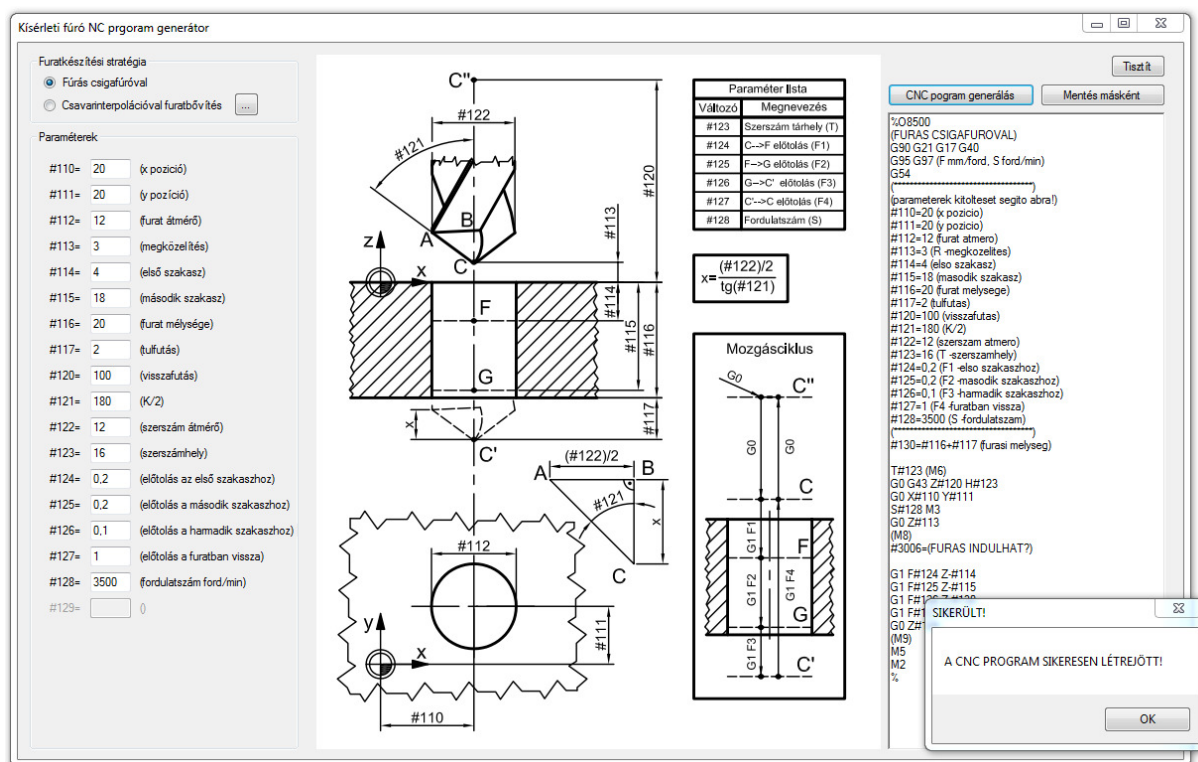


3.2. ábra
Kistler 9257BA típusú erőmérő cella

A Kísérleti fúrásokat vezérlő CNC programokat paraméteresen írtam meg (1. sz. melléklet), hogy tetszőlegesen, gyorsan és biztonságosan lehessen a fúrás-technológiai paramétereit beállítani/módosítani. A paraméteres CNC program változóinak feltöltése történhet:

- A szerszámgép tasztatúráján. (Eközben áll a szerszámgép, nem termel → kiesés)
- Szövegszerkesztőben. (lassú, elgépelés veszély)
- CNC program Editorban. (lassú, fizető)
- Szoftveres támogatással.

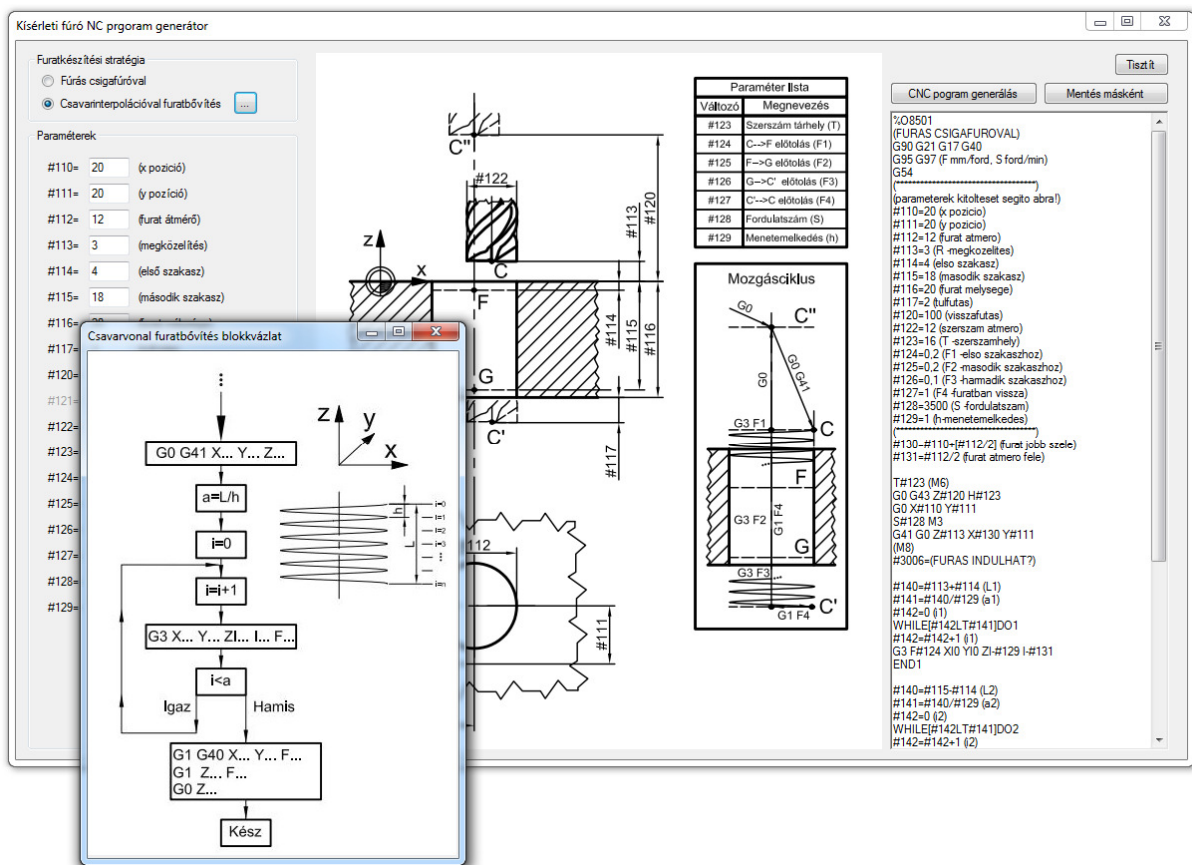
A változók feltöltése nagy odafigyelést igényel, hiszen ha elgépelünk egy karaktert, vagy véletlenül kitörlünk a programból valamit, az súlyos következményekkel járhat (pl. szerszámtörés). A legbiztonságosabb, leggyorsabb megoldás a paraméterek feltöltésére az, ha egy célszoftvert használunk. Ilyen nem áll rendelkezésünkre, ezért fejlesztetem egy Windows operációs rendszeren futó szoftvert, ami grafikusan segíti a paraméteres CNC program paraméterfeltöltését. A program futásáról néhány képet láthatunk a 3.5. és 3.6. ábrán.



3.5. ábra

Paraméteres CNC fúróprogram változóinak feltöltését végző szoftver (fúrás csigafúróval)

A 3.5. ábrán látható, hogy az ablak bal szélén fel kell tölteni az egyes Szövegbokszoikat, amihez grafikus segítséget nyújt az ablak közepén lévő stratégiaábra. Amennyiben elfelejtünk kitölteni egy változót, vagy nagyságrendekkel hibás értéket írunk, akkor figyelmeztetést kapunk. A sikeresen legenerált CNC programot menthetjük a merevlemezre, ahonnan akár közvetlenül küldhetjük a szerszámgép számára az elkészült vezérlőprogramot.



3.6. ábra

Paraméteres CNC fúróprogram változónak feltöltését végző szoftver (orbitális fúrás származóval)

A paraméterfeltöltés a fejlesztett szoftverrel segítségével egyszerű, gyors és biztonságos lett.

Fúrások erőméréssel

A 11. sz. mellékletben látható munkadarabon tervezett kísérletek során három furás nem kívánt technológiai beállításokkal ment végbe, ezért plusz egy (azonos anyagminőségű) munkadarabon kellett a kimaradt furatokat megmunkálni. A fúrási kísérletek tehát két ütemben folytak le.

Az első ütemben a 2. sz. mellékletben található táblázatban foglalt szerszámokkal és technológiai paraméterekkel kísérleteztünk, míg a második ütemben a kísérlet adatait a 3. sz. mellékletben található táblázat foglalja össze. Forgácsolás során mértük a forgácsoló erő mindhárom komponensét (x , y és z : főforgácsoló erőket) 500 Hz mintavételezési frekvenciával, a Dyno Ware szoftverrel gyűjtöttük az adatokat.

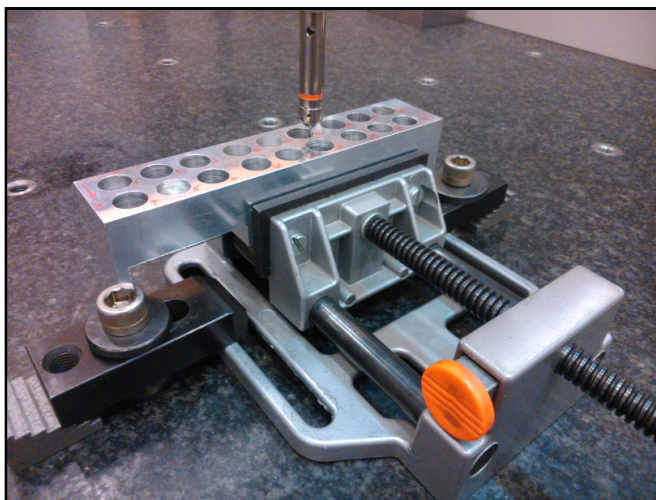
A fúrási kísérletek során minden szerszámot ISO kúpos patronos befogóval rögzítettük a szerszámgép főorsójába. Emulziós elárasztásos hűtést alkalmaztunk minden esetben, kivéve az egyenes hornyú fúró esetében. Ekkor belső hűtést kellett alkalmazni, hogy a hűtő-kenő folyadék kihozza a forgácsot a furatból (*a hornyok nem csavartak, nem képesek kiszállítani*).

3D koordináta mérőgéppel geometriai jellemzők felvétele

A 2-3 sz. mellékletekben található táblázatokból láthatjuk, hogy az előtolást a furat bekezdő részénél egyes fúrési stratégiáknál kisebbre vettük fel, hogy vizsgáljuk a hatását (magyarázatot lásd: kiértékelés fejezet). Ezért a furatoknak a körkörösségét két furatmélységben készítettük el. A belépési él alatt kettő illetve tíz milliméterrel. Az egyes köröket 400 mérési ponttal vettük fel. Megmértük továbbá a furatok merőlegességét a „felső” síkhoz képest. A 3D-s koordináta mérőgép a 3.7. ábrán, míg a befogott munkadarab a 3.8. ábrán látható. A mérési dokumentációk a 4. sz. mellékletben találhatóak.



3.7. ábra
Koordináta mérőgép



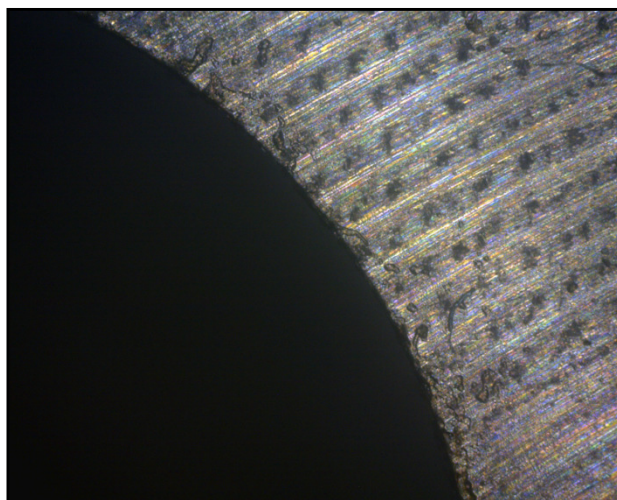
3.8. ábra
Koordináta mérőgépbe befogott munkadarab merőlegességi mérés közben

Mikroszkóppal sorja vizsgálat

A sorját a be és kilépő éleken Dino-lite AD7013MZT típusú digitális mikroszkóppal vizsgáltam. A mikroszkóp által készített képeket (5. sz. melléklet) a DinoCapture szoftverrel rögzítettem és értékeltem ki (kalibrálás után mérő funkciók állnak rendelkezésre). A mérési elrendezést mutatja a 3.9. ábra. Egy, a mikroszkóp által készített kép látható a 3.10. ábrán.



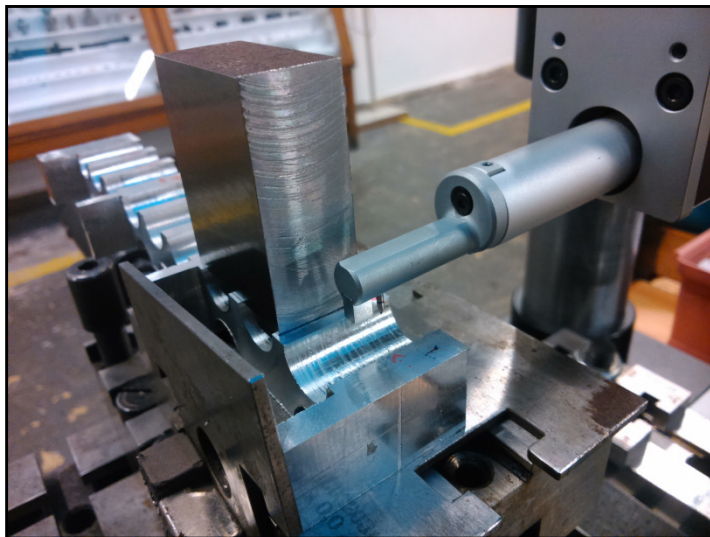
3.9. ábra
Mérőmikroszkóp és a munkadarab



3.10. ábra
90x nagyításban a 3. élű fúróval készített 1.sz. furat belépő éle

Marógépen a munkadarab előkészítése érdesség méréshez

Az érdesség mérő berendezéssel nem tudunk egy furatba „belenyúlni” és ott palástfelületi érdességet mérni, ezért szabaddá kellett tenni a furatot, hogy a mérő műszer feje beférjen. Ezt úgy oldottuk meg, hogy az egy sorban levő furatok furatközéppontjától jobbra (*másik sornak balra*) lévő anyagrészt lemartuk. Az így kialakult geometriát láthatjuk a 3.11. ábrán.



3.11. ábra
Érdesség mérő gyémántcsúcs és a munkadarab



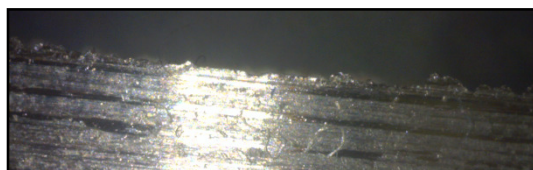
3.12. ábra
Érdesség mérési elrendezés

Érdesség mérés a furat palástfelületén

A palástfelületi érdességet a 3.12. ábrán látható mérési elrendezéssel mértem. A gyémántcsúcs (3.11. ábra) által érzékelt felületi egyenetlenségeket egy Mitutoyo SJ-400 típusú adatgyűjtő egységgel gyűjtöttem. Furatonként 3 mérésre volt szükség, mert a munkadarab rögzítő készülékre nem volt úgy felhelyezhető a munkadarab, hogy egy lökettel lemérhető legyen az egyes furatok érdességi profilja. Egy befogásban megmértem a belépő él közeli, egy befogásban a kilépő él közeli és plusz egy fogásban a két szakasz közötti érdességet. A mért adatokból számolt érdesség jellemzők a 6. sz. mellékletben megtalálhatóak.

Mikroszkóppal a furat palástfelületének vizsgálata

A 3.9. ábrán látható méréshez hasonló módon rögzítettem a furat palástfelületi egyenetlenségeiről néhány képet. A 3.13. ábrán látható egy furat be- és kilépő él közeli palástfelülete. (7. sz. melléklet)



3.13. ábra
Ugyanazon furatról készült képek. Belépő él közeli baloldalt és kilépő él közeli felület jobboldalt

3.2. Kiértékelés

A kísérletek során az előtolás, a forgácsolási sebesség és a szerszámok voltak azok a faktorok, amiknek a forgácsolhatóságra gyakorolt hatását vizsgáltam. Az első fúráshoz képest minden továbbinál egy faktort változtattam meg, hogy egyértelműen meghatározható legyen a faktor hatása a forgácsolhatóságot jellemző paraméterekre. A forgácsolhatóság komplex jellemző⁶, amely jellemzi az előállított felületet. A forgácsolhatóságot jellemző paraméterek közül a következőket vizsgáltam:

- Fúráshoz szükséges erőkomponensek (F_x , F_y , F_z)
- Felületi érdesség jellemzők (R_a , R_z , R_p , R_v , R_{max})
- Alakhibák ($H_{KÖR}$, H_{MER})⁷
- Sorja magasságot (x)
- Él kitöredezés mélységet (z)

A felsorolt forgácsolási jellemzőket megmértem, illetve a mért adatokból kiszámoltam. A számolások során használt összefüggéseket a 12. sz. mellékletben foglaltam össze. A jellemzőket összehasonlítottam egymással, ezzel következtetéseket tudtam levonni az egyes faktorok forgácsolási folyamatra gyakorolt hatásáról.

Forgácsoló erők kiértékelése

A forgácsoló erőkomponenseket $f_1=1000$ [Hz] és $f_2=500$ [Hz] mintavételezési frekvenciákkal mértem, a mérés ideje pedig $t_1=10$ [s] volt az első kísérletsorozatnál (22 furat), és $t_2=70$ [s] volt a második kísérletsorozatnál (3 furat). Így a kiértékeléshez kapott pontok száma:

$$P_1 = f_1 t_1 = 1000(10) = 10\,000 \text{ [db/furat]}$$

$$P_2 = f_2 t_2 = 500(70) = 35\,000 \text{ [db/furat]}$$

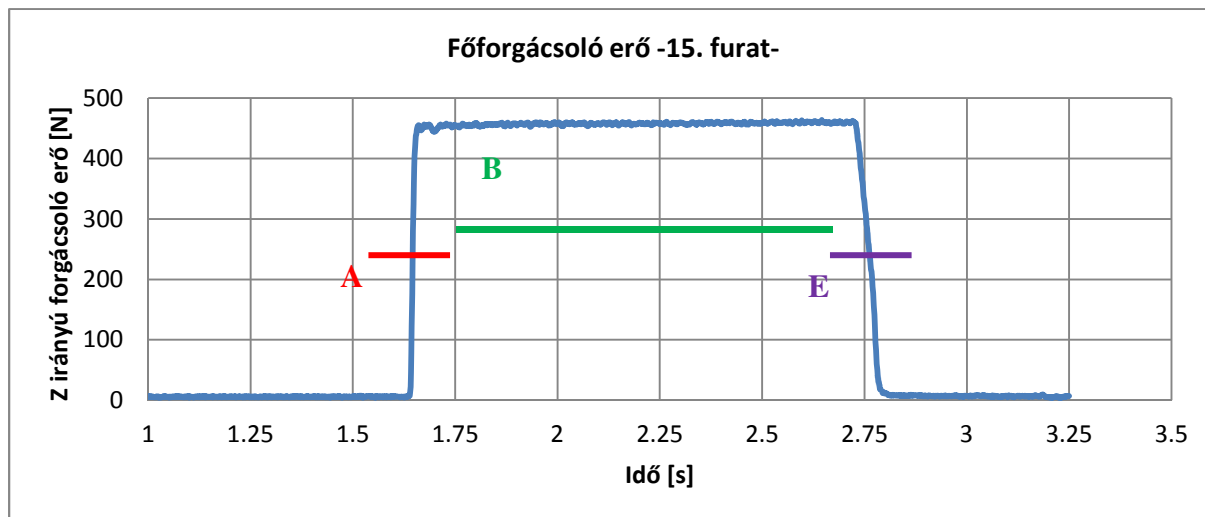
, ahol P_1 := pontok száma az első kísérlet sorozatnál, P_2 := pontok száma a második kísérlet sorozatnál. A pontokra Microsoft Excel táblázatkezelő szoftver segítségével görbéket illesztettem. Az így kapott közelítő fő forgácsoló erő ($F(z)$) görbéket tartalmazza a 9. sz. melléklet. A mérési hosszon belül megkülönböztettem három nevezetes tartományt:

1. Bekezdő rész (*erő felfutás*)
2. Középső rész (*erő konstans jellegű*)
3. Kilépő rész (*erő lefutás*)

⁶ Nem jellemezhető egy mennyiséggel, pl.: egy mérőszámmal. Több mennyiség jellemzi.

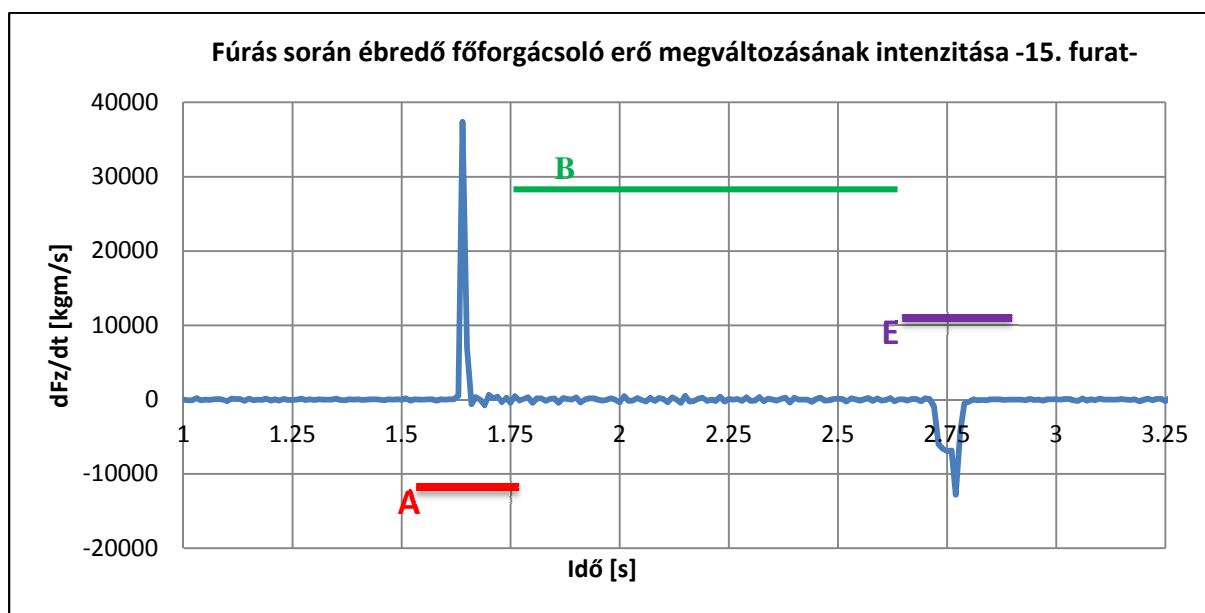
⁷ A jelölések a 9. sz. mellékletben magyarázva

A 3.14. ábrán a 15. furathoz tartozó fő forgácsoló erő közelítő függvénye látható. A három nevezetes tartományt rendre az A) piros, B) zöld és E) lila intervallumokkal jelöltem. A kiértékelés során kerestem az maximális fő forgácsoló erő helyét és nagyságát. Az erő nagyságát jellemzőként lehet használni, míg az erő helye megmutatja a kritikus tartományt.



3.14. ábra
Fő forgácsoló erő alakulása a 15. számú furat fúrása során.

Nem elegendő csupán az erőhatásokat vizsgálni. Hiszen nem mindegy, hogy milyen gyorsan változott az erő. Az erő változásához idő szerint le kell deriválni a 3.14. ábrán látható függvényt. A deriválás előtt simítani kell a függvényt, hiszen olyan sűrűn vannak a pontok, hogy a derivált értéke (*meredekség*) két mérési pont között is lehet olyan nagyságrendű, mint a vizsgálandó be és kilépéskor keletkező erőváltozásnál. A függvényt simítás és deriválás után a 3.15. ábrán látható függvényt kapjuk.



3.15. ábra
15. furathoz tartozó fő forgácsoló erő függvény deriváltja

Látható, hogy az A) és az E) szakaszon a derivált értéke visszaadja a valóságban lezajló eseményeket. A két szakaszon számított deriváltak abszolút értékének maximuma jellemzi a ki- és belépési eseményeket. Minél nagyobb az A) szakaszon a maximális derivált értéke, annál nagyobb a dinamikus igénybevétele a szerszámnak, szerszámgépnek, munkadarabnak. Minél nagyobb az E) szakaszon a derivált abszolút értékének maximuma, annál nagyobb mértékben csökken az erő, tehát növekedik az előtoló sebesség (lásd: *kilépési jelenség*). Ez a két mérőszám is jellemezni képes a furat megmunkálási stratégiákat. Matematikailag:

$$F_{(z)} [N] \xrightarrow{\text{deriválás}} \frac{d}{dt} F_{(z)} \xrightarrow{\text{abszolút érték}} \left| \frac{d}{dt} F_{(z)} \right| \xrightarrow{\text{"A" tartományon max}} \max \left| \frac{d}{dt} F_{(z)} \right|_A$$

$$I_A := \max \left| \frac{d}{dt} F_{(z)} \right|_A \text{ [kgm/s]}$$

$$I_E := \max \left| \frac{d}{dt} F_{(z)} \right|_E \text{ [kgm/s]}$$

, ahol:

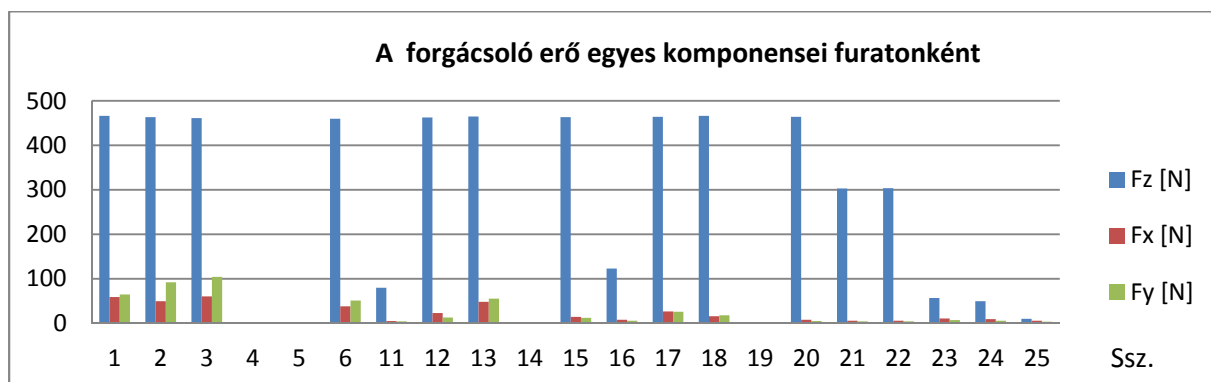
$F(z)$ A fő forgácsoló erő közelítő függvénye [N]

d/dt Differenciálási operátor

I_A „A” intervallumon az erő változás maximuma [kgm/s]

I_E „E” intervallumon az erő változás maximuma [kgm/s]

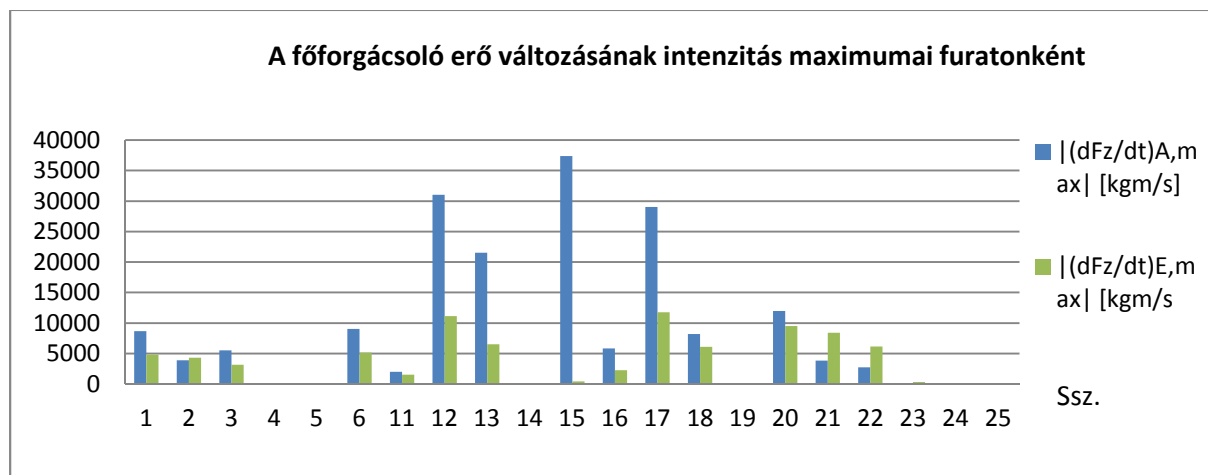
Az ismertetett algoritmusok alapján kiszámoltam a furatokhoz tartozó erő-alapú jellemzőket, amiket a 3.16 és 3.17. ábra foglalja össze. A fúrás során keletkező x, y irányú forgácsoló erők nagyságuk miatt elhanyagolhatóak (lásd: 3. 16. ábra).⁸



3.16. ábra
A forgácsoló erő egyes komponensei furatonként

⁸ A diagramokon a 2.1; 2.2 és 2.3. furatokat rendre a 23; 24 és 25. sorszámú furatok jelölik

Látható, hogy a főforgácsoló erők közel azonosak az 1,2,3,6,12,13,15,17,18,20 furatoknál. A 4,5,14,19 furatoknál nem mértünk erőt, míg a 11,16,25 furatok felfúrással készültek. A 23,24 furatok orbitális fúrással. Leolvasható a diagramról, hogy a szerszámgépet az orbitális fúrás terheli a legkevésbé. Azt is megfigyelhetjük, hogy a furat bekezdő részén az eredeti felére lassított előtolási sebességnek nagyon kevés hatása van a maximális Fz értékére.



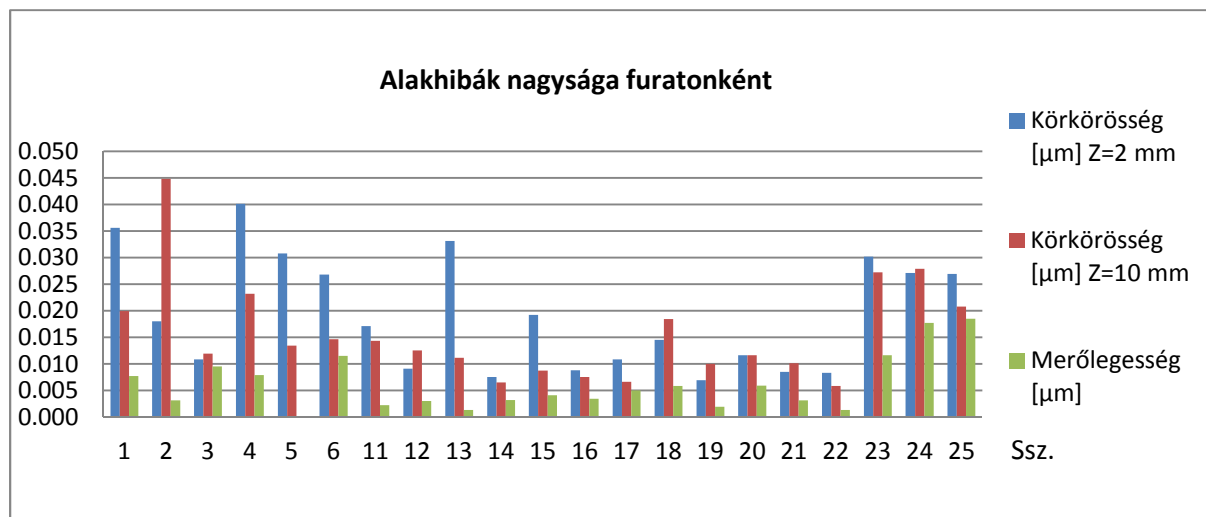
3.17. ábra

A főforgácsoló erő változásának intenzitás maximumai furatonként

A 3.17. ábrán látható azonban, hogy az erőváltozás a kisebb előtolásnál igazolja az elvártakat. Ha kisebb sebességgel ütődünk a munkadarabnak, akkor kisebb lesz a dinamikai hatás. Ezek szerint, ha a maximális forgácsoló erőt nem is, de az erő változásának mértékét befolyásolni tudjuk a furat be- és kilépő élén az előtolás csökkentésével. További grafikonok és konkrét függvényjellemző paraméterek találhatóak a 9. sz. mellékletben, összefoglalva táblázatosan a 8. sz. mellékletben.

Alakhibák kiértékelése

Az alakhibák (*is*) jellemzik az elkészült furatok minőségét. Az alakhibákat Zeiss 3D koordináta mérőgéppel detektáltam. A mérőgéppel felvettem a furatok pozícióját, majd alkalmasan megválasztott mérési ciklusokkal körönként 400 pontot vettem fel. A mérőgéphez tartozó kiértékelő szoftver segítségével mérési jegyzőkönyveket (4. sz. melléklet) készítettem, amik magában foglalják a szoftver által, Csebisev módszerrel becsült körkörösségi, illetve a mérőlegességi hibák nagyságát. Az alakhibák összefoglalása a 8. sz. mellékletben található. A körkörösségi hibák grafikus jegyzőkönyvei a 4. sz. mellékletben találhatóak. Az alakhibákat foglalja össze a 3.18. ábra.



3.18. ábra
Alakhibák nagysága furatonként

A 3.18. ábrán kék színnel jelöltem a 2 [mm] mélyen végzett mérés eredményeit, míg pirossal a 10 [mm] mélyen mért eredményeket. Az első a furat belépő él közeli alakhibájáról, míg az utóbbi a furat közepéről ad információkat. Zöld színnel jelöltem a merőlegességi hibákat. A diagram alapján a 2 [mm] mélyen mért körköröség hibák nagyobbak, mint a furat közepén mérték. Az előtolás változtatás hatására az 1,2 furatoknál a belépési alakhiba csökkent, de a középső részen nőtt. A 12,13 párosról azonban pont az ellenkezője mondható el. 18,19 párosnál az előtolás csökkentés hatására mindkét alakhiba csökkent. A merőlegességi hibák mindhárom páros esetében csökkentek, ha a bekezdő részen csökkentettük az előtolást. Az orbitális fúrások során arányaiban nagyok a merőlegességi hibák, míg a körköröségi hibák az előtolás változtatás hatására kevésbé tértek el, mint más szerszámoknál ez megfigyelhető volt.

Felületi érdességek kiértékelése

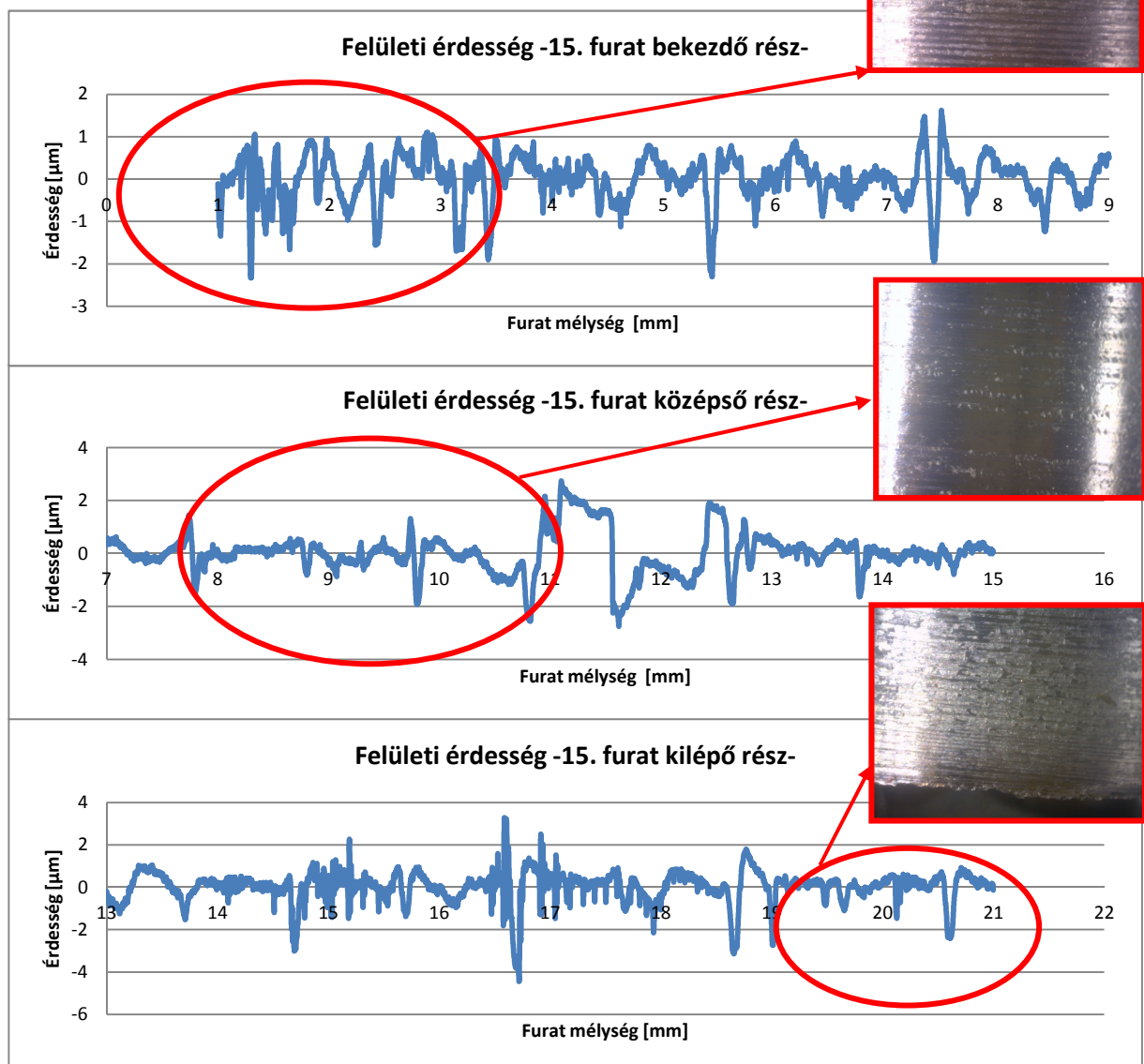
A felületi érdességet szabványos $h=8$ [mm] mérési hosszon mértem. A furatok mélysége 21,5 [mm], így több szakaszból állt egy furat érdesség profiljának feltérképezése. A három szakasz a következő volt:

- Bekezdő rész $z=(1;9)$ [mm] intervallumon
- Középső rész $z=(7;15)$ [mm] intervallumon
- Kilépő rész $z=(13;21)$ [mm] intervallumon

Az intervallumokból látható, hogy a három szakasznak vannak közös részei. Az érdesség profil mérése során a Mitutoyo adatgyűjtő egység milliméterenként ezer diszkrét érdesség magasság értéket gyűjtött. Az adatsorra a Microsoft Excel táblázatkezelő segítségével görbét illesztettem, majd a felületi érdesség jellemző méreetszámait kiszámoltam.

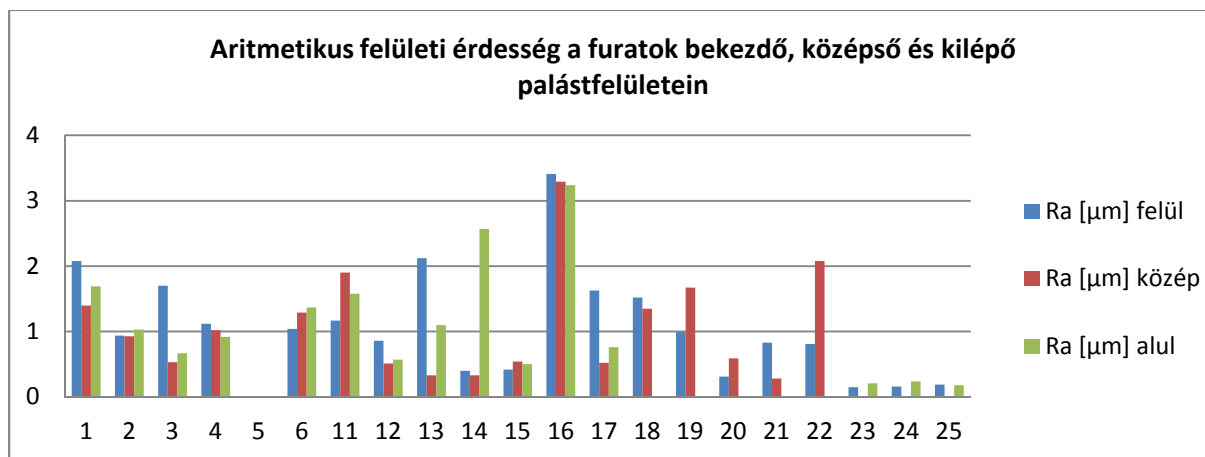
A 3.19. ábrán a 15. furat érdesség profilja látható három szakaszon. A három szakaszon mért és számított érdesség jellemzők alapján következtetéseket tudunk levonni a kísérlet során vizsgált faktorok hatásáról. Az érdesség profilok a 7. sz. mellékletben találhatóak. Táblázatosan összefoglalva a 6. sz. mellékletben találhatóak az érdesség profilt jellemző mennyiségek:

- R_a [μm] Aritmetikus (átlagos) felületi érdesség
- R_z [μm] Érdesség magasság
- R_p [μm] Kisimítási mélység (max)
- R_v [μm] Profilvölgy (min)
- R_{max} [μm] Maximális érdesség magasság
- X_{Rp} [mm] Maximális kisimítási mélység helye
- X_{Rv} [mm] Minimális profilvölgy helye



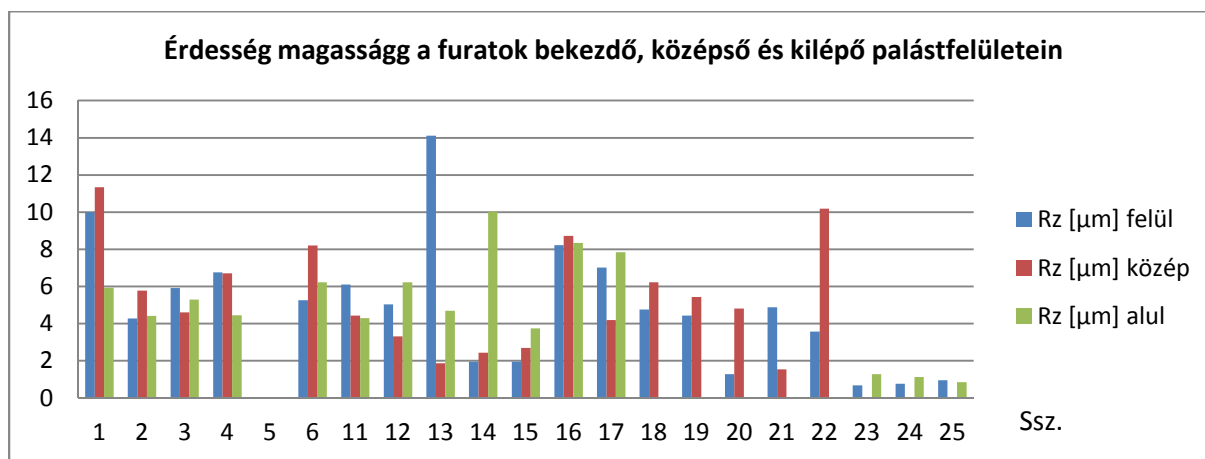
3.19. ábra
15. furat érdesség profilja a három mért szakaszon

A 3.20. ábra mutatja a megmunkált furatok átlagos felületi érdességét. Az 1,2 furatpárnál az előtolás csökkentése kedvező hatással volt, mindhárom szakaszon csökkent. A 12,13 furatpárnál a középső részen csökkent, míg a másik két részen nőtt a felületi érdesség ugyanezen faktor hatására. A 18,19 párosnál arányaiban nem változott az átlagos felületi érdesség.



3.20. ábra
Aritmetikus felületi érdesség a furatok bekezdő, középső és kilépő palástfelületein

A 16. furatot furatbővítéssel készítettük. Látható, hogy az átlagos felületi érdessége ennek a furatnak magasan a legrosszabb. Ez annak az oka lehet, hogy a furatbővítés során a szerszámnak kicsi volt a fogása az anyagban, berezonált, és ez a rezgés rámásolódott a munkadarabra. A 23,24,25 orbitális fúrásokkal értem el a legjobb átlagos felületi érdességet.

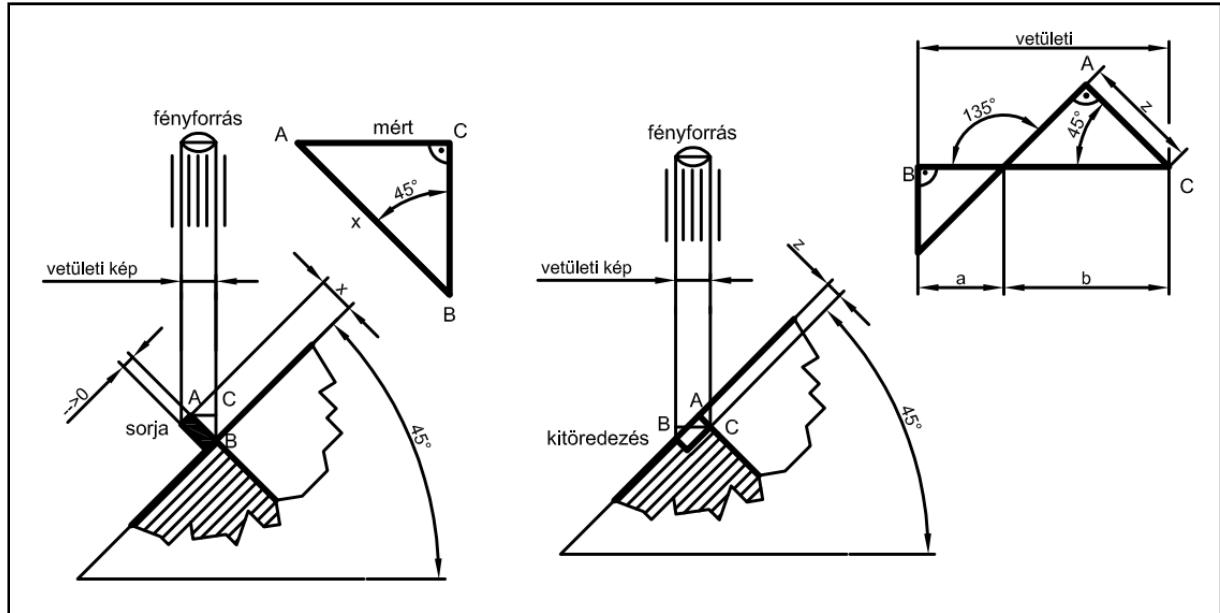


3.21. ábra
Érdesség magasság a furatok bekezdő, középső és kilépő palástfelületein

Az érdesség magasságok diagramon (3.21. ábrán) látható, hogy jellegre hasonlóak az érdességi mérőszámok, mint az átlagos felületi érdességnél. Az arányossági szorzó 3-4 között van. A kisimítási mélységhez, a profilvölgyekhez és a maximális érdesség magasságokhoz tartozó grafikonok a 10. sz. mellékletben találhatóak.

Sorja és kitöredezés mértékének meghatározása

Az elkészült furatokat digitális mikroszkóppal vizsgáltam. A digitális mikroszkóp kalibrálása után a kiértékelő szoftver képes arra, hogy a mikroszkóp képét lementsük és méréseket hajtsunk vére rajta. Így a 45°-ban bedöntött munkadarabról készült képek alapján a sorja és a kitöredezések nagysága a 3.22. ábra alapján számítható volt.



3.22. ábra
Sorja és kitöredezés becslése mikroszkóp segítségével

Amennyiben a sorja szélessége elhanyagolható a magasságához képest, akkor ABC háromszögből számítható a magassága, ha a vetületi mérete a sorjának V ..

$$\sin(45^\circ) = \frac{V}{x} \Rightarrow x = \frac{V}{\sin(45^\circ)} = \frac{v}{\frac{\sqrt{2}}{2}} \approx 1,41 \cdot V [\text{mm}]$$

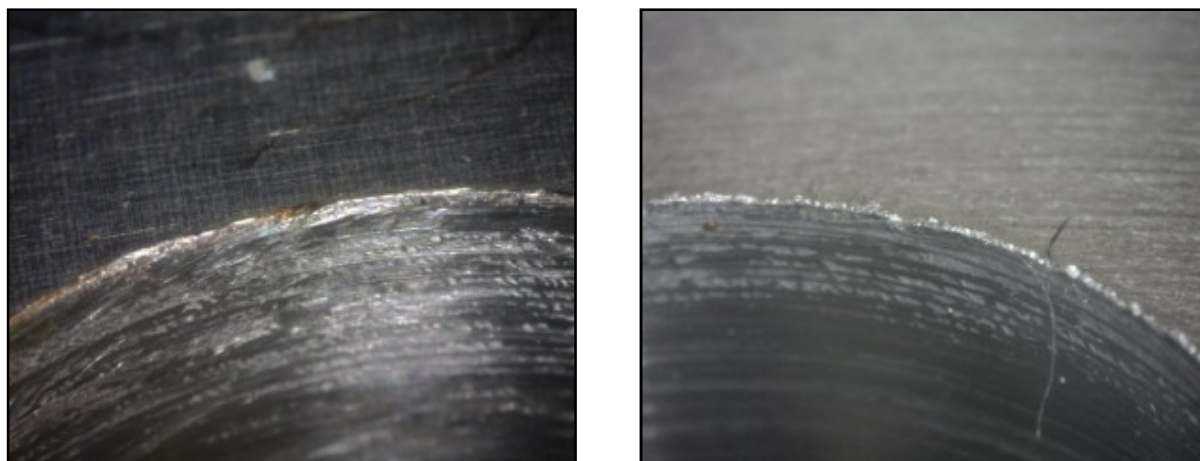
Amennyiben a kitöredezés alakja olyan, hogy $a=b$ (lásd: 3.22. ábra), akkor a kitöredezés mélysége egyszerűen számolható, ha a vetületi mérete a kitöredezésnek K ..

$$\cos(45^\circ) = \frac{z}{K} \Rightarrow z = \frac{K}{2} \cos(45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{4} K \approx 0,35 \cdot V [\text{mm}]$$

Az ismertetett képletek alapján becsültem az egyes furatok be és kilépő élein a maximális sorja és kitöredezés méreteket. A mért és számított jellemzőket összefoglaló táblázat a 8. sz. mellékletben található. A mikroszkóppal készített fényképek az 5. sz. mellékletben találhatók.

A 3.23. ábrán láthatóak a 15. furat be és kilépő éleiről készült mikroszkópos felvételek. A belépő él sorjamentes, míg a kilépő élen $x=0,17$ [mm] maximális magasságú sorja található. A belépő élen a kitöredezés mélysége $z=0,18$ [mm], míg a kilépő él kitöredezés mentes. Az összes furatnál a következő tendencia figyelhető meg:

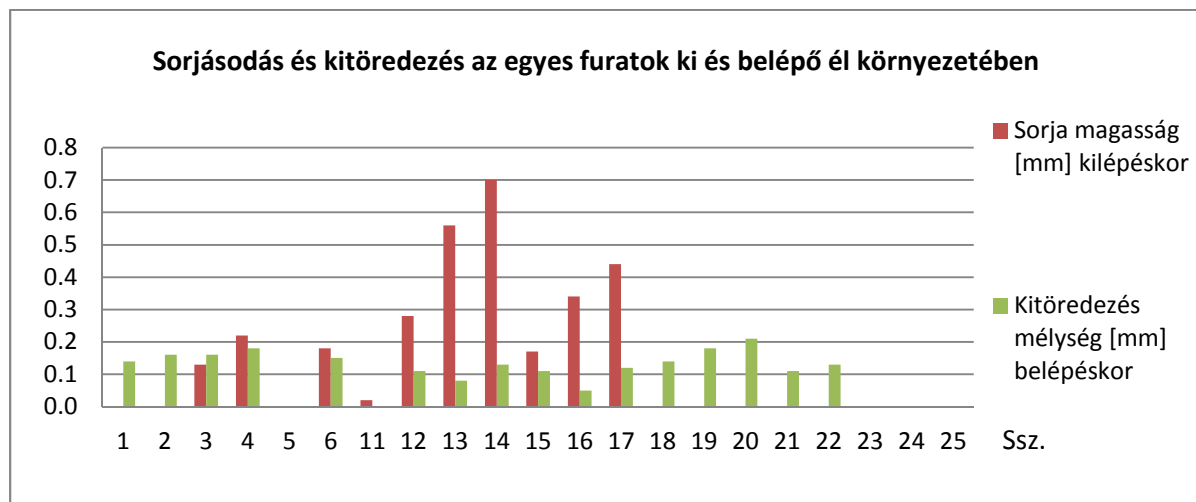
- A belépő élek sorja mentesek,
- a kilépő élek kitöredezés mentesek.



3.23. ábra
15. furat be (balra) és kilépő (jobbra) élei

A kilépő éleken azért nincsen kitöredezés, mert a fúró ott „kinyomja” az anyagot. Ekkor nő a képlékeny alakulás részaránya, ezért nem tud kitöredezni, viszont megjelenik a sorja. A belépő éleken a képlékeny alakváltozás minimális. A kitöredezést az MKGS rendszer tagjainak rezgése és a furatból távozó sorja koptató hatása okozhatja.

A furatok él geometriai jellemzőit foglalja össze a 3.24. ábra.



3.24. ábra
Sorjásodás és kitöredezés az egyes furatok ki és belépő él környezetében

A 3.24. ábrán és az 5. sz. mellékletben látható, hogy az orbitális fúrással készített furatok élei sorja és kitöredezés mentesek. A legnagyobb sorját a lapos fúró ($K=180^\circ$) okozta, míg a legnagyobb kitöredezéseket a négy élű, egyenes hornyú fúró. Az 1,2; és 18,19 furat pároknál az volt tapasztalható, hogy ha csökkentjük az előtolást a furat bekezdő részén, akkor nő a kitöredezések mérete. A 12,13 furatpárnál a kitöredezés csökkent az előtolás csökkentésével. A forgácsolási sebesség növelésével nőtt a sorja a 13,14 páros esetében, azonban a 15,16 párosnál csökkent, holott ugyan azzal a szerszámmal készítettük ezeket a furatokat.

Összefoglalás

A TDK munkám első részében alumínium ötvözet forgácsolhatósági jellemzőit vizsgáltam, hogy később összehasonlítási bázisként tudjam használni a polimer kompozit megmunkálás jellemzőinek kiértékeléséhez.

Bevezettem a *főforgácsoló erő változás intenzitásának maximumát (FEVIM)*, mint technológiát minősítő mennyiséget. Első körben a főforgácsoló erő és a FEVIM alapján értékeltem az egyes furatok minőségét. Kimutattam, hogy a furat bekezdő részén felére lassított előtolási sebességnek csekély hatása van a maximális fő forgácsoló erő értékére, a FEVIM -et viszont nagymértékben befolyásolni tudjuk ezzel a technológiai változtatással.

Megfigyeltem, hogy a merőlegességi hibák csökkentek, amikor a bekezdő részen csökkentettük az előtolást. Az orbitális fúrások során arányaiban nagyok a merőlegességi hibák, míg a körkörösségi hibák az előtolás változtatás hatására kevésbé térnek el, mint más vizsgált szerszámoknál. A két milliméter mélyen mért körkörösség hibák jellemzően nagyobbak, mint a furat közepén.

Vizsgáltam a felületi érdesség egyes mérőszámait, az orbitális fúrással értem el a legjobb eredményeket.

Végző elemzésként mikroszkóppal készített képek alapján becsültem az egyes furatok be és kilépő élein a maximális sorja és kitöredezés méreteket.

Az állításaimat az ismertetett kísérletterv alapján állítottam fel, ami nem terjedt ki minden faktor minden tartományára. Az új kísérlet (*ami alapján az állításaimat bizonyítani vagy cáfolni tudom*) tervezése már folyamatban van.

4. Szálerősített polimer mátrixú kompozit anyagok jellemzőinek és gyárthatóságának elméleti áttekintése

Ebben a fejezetben napjaink legfontosabb polimer mátrixú kompozitjainak egyes jellemzőit mutatom be. A jellemzés során kitérek a mátrix és erősítőanyag típusokra, a polimer kompozitok jelenlegi gyártástechnológiájára. Összefoglalom a legfrissebb kutatási eredményeket a polimer mátrixú kompozitok forgácsolt megmunkálása területén.

4.1. Polimer mátrixú kompozitok a műszaki gyakorlatban

A műszaki élet számos területén találkozhatunk polimer kompozitokkal, úgymint a hadi ipar, légi ipar, űrtechnológia, járműipar, hajózás, szerkezeti és építőipari alkalmazások területén. A hétköznapi területeken felhasznált kompozitok széles választékát (pl. autóalkatrészeket, hajótesteket, korrózióálló szerkezeteket) nem-folytonos, véletlenszerű eloszlású vágott szálakkal, vagy folytonos, de nem orientált szálformával kínálják. Az üvegszál erősítésű kompozitok általában merevek, ami alapvető követelmény a légiközlekedésben és az űrhajózásban alkalmazott szerkezeti anyagokkal szemben. Az üvegszál mellett a bőr-, szén-, aramid- szálak alkalmazása szintén meghatározó. A szénszállal erősített polimer kompozitokat elsődlegesen az űrhajózásban alkalmazzák, de a szénszálak csökkenő árával szélesedik ezeknek a kompozitoknak a felhasználási területe is. Alkalmazzák már az autóiparban, a hajóiparban, sportszerek és orvos biológiai termékek előállításához, illetve az építőiparban is. Polimer kompozit felhasználásra mutat példákat a 4.1. ábra.



4.1. ábra
Polimer kompozit felhasználási példák

4.1.1. Polimer mátrixú kompozitok mátrix anyagai

A járműiparban alkalmazott kompozitok mátrix anyaga alapvetően polimer. Mátrix anyagként mind hőre lágyuló, mind pedig hőre keményedő anyagok előfordulnak. Alapvető irányzatnak tekinthető a hőre lágyuló anyagok használata, hiszen ebben az esetben az újrahasznosítás sokkal könnyebb. A mátrix anyaga alapvetően két fő feladatot kell, hogy ellásson. Az egyik, hogy az erősítő anyagot rögzítse, a másik, hogy deformálódjon és a feszültséget megfelelően átvigye az erősítő részre. Természetesen ezeken túlmenően lényeges, hogy a mátrix anyag megvédje az erősítő anyagot a külső behatásoktól. [1]

A kompozitok mátrix anyaga alapvetően meghatározza az alkalmazhatóság felső hőmérsékletét. Az erősítő anyagok az esetek döntő többségében szerves anyagok, amelyeknek termikus stabilitása lényegesen meghaladja a szerves mátrix stabilitását. A 4.2. táblázat néhány polimer bázisú kompozit alkalmazhatóságának felső hőmérsékletét tartalmazza. [1]

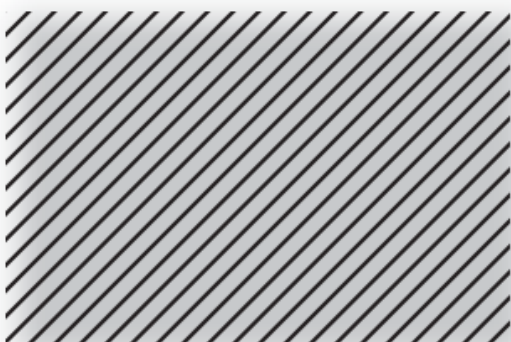
	Mátrix polimer	Alkalmazás felső határa (°C)
Hőre keményedő	Telítetlen poliészter	70
	Gumi	100
	Vinilészter	120
	Epoxi	170
	Fenol-aldehid	200
	Biszmaleimid	220
	Bisz(norbornén-imid)	300
Hőre lágyuló	Poliamid	100
	Polikarbonát	100
	Poliszulfon	180
	Poli(éter-éter-ke-ton)	170
	Poli(fenilén-szulfid)	240
	Poliimid	270

4.2. táblázat

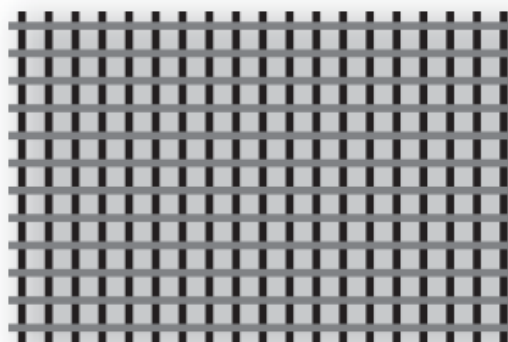
Néhány polimer kompozit alkalmazhatóságának felső hőmérséklete [1]

4.1.2. Polimer mátrixú kompozitok szál-erősítő anyagai

Az erősítőanyagok jellemzően nagyobb szakító szilárdságú anyagok, mint a mátrix anyag. Jellemzően szál alakúak, átmérőjük rendkívül kicsi ($\sim 8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$). Az elemi szálakat kötegelik általában, így a szál paradoxon értelmében az elméletinél is erősebbek. Szálak paradoxona: valamely anyag szál szerkezetű formájának szilárdsága sokszorosan nagyobb, mint ugyanannak az anyagnak egyéb formában való szilárdsága, és minél kisebb a szálas anyag keresztmetszete, annál nagyobb a viszonylagos szilárdsága (A. A. Griffith). [10] Az erősítő szálak különböző konfigurációkban jelentkezhetnek, erre két példát mutat a 4.3. ábra.



Egy irányban erősített



Két irányban erősített

4.3. ábra

Különböző erősítő szál konfigurációk [9]

Üvegszál

Az üveg, mint szerkezeti anyag, a *szilikátok* családjába tartozik. Elsősorban szilícium-oxidokból (SiO_2) áll, ez adja az üvegek 55–65 %-át. Emellett tartalmaz egyéb fémoxidokat is, főleg CaO , Al_2O_3 , MgO , Na_2O , B_2O_3 alkotókat. Az ömledékből megfelelő fonófejen át nagyszilárdságú szálát húzhatunk, rendszerint 10^3 nagyságrendű elemi szálból álló köteg (*roving*) formájában (4.4. ábra). Az elemi szálak átmérője $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$. [3]



4.4. ábra
Üvegszál erősítőanyag



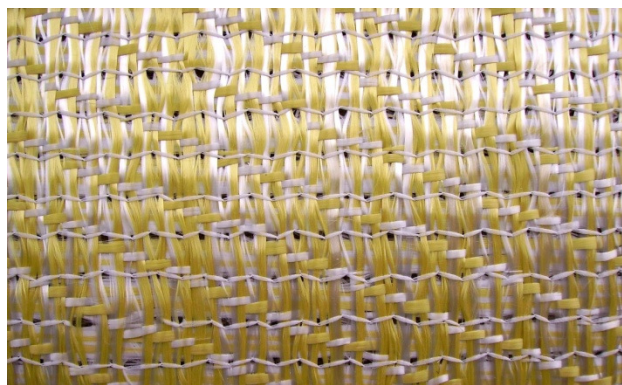
4.5. ábra
Szénszál erősítőanyag

Karbonszál

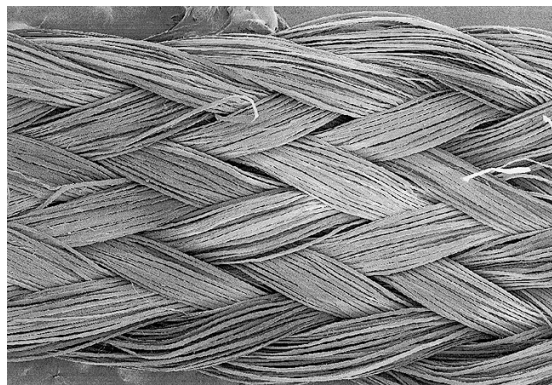
A szén kapcsolódási módjainak sokoldalúsága, a sokféle rendezettségi forma, amelyet a szénláncok képeznek, a polimerek műszaki anyagtudományának középpontjában áll. A nagy fajlagos felületű *korom*, mint a gumi kompozitok aktív – kémiaiilag is kötődő – töltőanyaga, szintén régóta ismert. A szénből megalkotott erősítőszálban a szén grafitos szerkezetét hasznosítjuk. A karbonszálakban ezt a rendkívüli grafit-szilárdságot és az ezzel párosuló igen nagy moduluszt használjuk ki kompozit erősítésben. A karbon-szál, amelynek tipikus átmérője 7–8 μm , 40 000 elemi szálat tartalmazó kötegben (tow) készül és kerül karbonizálásra. [3] Kereskedelembe kapható karbon köteget mutat a 4.5. ábra.

Aramid-szál

A para-kapcsolódású aromás poliamid szálak (KEVLAR, TWARON, TECHNORA) 3000 MPa feletti szakítási szilárdságukkal és 60-120 GPa közötti húzó moduluszukkal a legjobb acélhuzalokkal vetekszenek, miközben sűrűségük csak $1,44 \text{ g/cm}^3$, s így még a karbon-szálnál is könnyebbek. Az aramid-szállal erősített kompozit kitűnik rendkívüli szívósságával, ütésállóságával is.[2] Az aramid szál kiemelt szerepet kapott a golyóálló kompozitokban. Helikopter rotor lapátok előállításánál, nyomás alatti gáztartályoknál, és minden olyan esetben, amikor a szerkezet erős stressz hatásnak vagy vibrációnak van kitéve, aramid-szálat alkalmaznak.[3] Kereskedelembe kapható aramid köteget mutat a 4.6. ábra.



4.6. ábra
Aramid-szál erősítőanyag



4.7. ábra
Polietilén-szál erősítőanyag

Polietilén-szál

Az 1990-es évek technológiájának e vívmánya igen sokat ígérő, hiszen a legolcsóbb alapanyagból, nem túl költséges technológiával rendkívüli szilárdságot hoz ki. A 3000 MPa feletti szakítási szilárdság, amely a víznél kisebb sűrűséggel párosul, a tömeghez viszonyítva mindenesetre messze meghaladja az acél mutatóit. A nagy modulusú polietilén szálakat

sportszerek előállításánál és repülőgép belső, golyóálló burkolataihoz alkalmazzák elsősorban. Kereskedelemben kapható polietilén köteget mutat a 4.7. ábra.

Egyéb erősítőszálak

A polimer kompozitok egyéb erősítőszálai között kiemelkedőek a fémszálak. Az acélszálak erősítő funkciója a gumi kompozitokban (*acélradial gumibroncs, nyomásálló gumitömlők, szállítószalagok*) közismert és jól bevált. Itt is különös figyelmet kell fordítani a határfelületi réteg tapadásközvetítő funkciójára. Ezt gyakran az acélhuzal galvanikus rézbevonatával javítják. Növekvő jelentőséget kapnak a bórszálak az újabb kompozitokban. Ezt rendszerint bórhidok redukciójával állítják elő igen vékony wolfram szál mag felhasználásával. Újabban egyre több hőálló erősítő szálát fejlesztenek ki a kvarc-aluminát-bór összetett rendszer alkalmazásával. Ezek a szálak az erősítés mellett villamos vezetőképeséget is eredményeznek.[2] Bórszállal készítenek kompozitokat sportszerektől kezdve (pl. horgászboto, golf eszközök, sílécek, kerékpárvaak) egészen a repülőipari alkalmazásokig (pl. repülőgép farokfelületének a borítása, űrsikló rácsszerkezeti elemek). Napjainkban kezdenek el megjelenni a kerámia és bazalt erősítőszálak is. A 4.8. táblázat a leggyakrabban alkalmazott erősítőszálak jellemző tulajdonságait mutatja. [3]

Szál anyaga	Sűrűség (g/cm ³)	Olvadáspont (°C)	Fajlagos modulus (GPa cm ³ /g)	Fajlagos szilárdság (GPa cm ³ /g)
Bór	2,30	2100	192	1500
Acél	7,87	1620	25	530
Szén	1,76	3700	114	1570
Grafit	1,50	3650	230	1840
E-üveg	2,54	1316	28	1360
S-üveg	2,49	1650	34	1940
Aramid	1,14	350	5,8	730
Poliészter	1,40	250	2,9	490
Polipropilén	0,90	170	1,8	77
Si ₃ N ₄	2,50	1900	100	1344

4.8. táblázat

A leggyakrabban alkalmazott erősítőszálak jellemző tulajdonságai [3]

4.2. Polimer mátrixú kompozitok előgyártása

A szálerősítésű polimer kompozit alkatrészek és termékek előgyártási technológiáit az alábbi szempontok alapján célszerű csoportosítani: [2]

- Hőre lágyuló polimer mátrixú rendszerek
- Elasztomer alapú kompozitok
- Duromer mátrix alapján felépített kompozitok

Ezek közül az első csoport, a hőre lágyuló polimer mátrix alapján felépített és rövid (*vágott*) szállal erősített kompozitok egyre bővülő családjának feldolgozási technológiái lényegében a képlékeny alakítás kémiai reakciókkal nem járó technikái. Ezzel szemben az elasztomer és duromer kompozit technológiák reaktív feldolgozási technikák, amelyben a kompozit mátrix kívánatos sűrűségű térhálóját a végső feldolgozási technológia során kell kialakítanunk. A hőre lágyuló kompozitok feldolgozás technikái lényegében sajtolási, fröccsöntési, extrudálási, melegformázási technikák. A feldolgozási folyamat reológiája, az ömledékáramban úszó rövid erősítőszálak végső orientációja természetesen nagymértékben befolyásolni fogja a technológia eredményességét, a kompozit jellegét, a szálerősítés hasznosulását. [2]

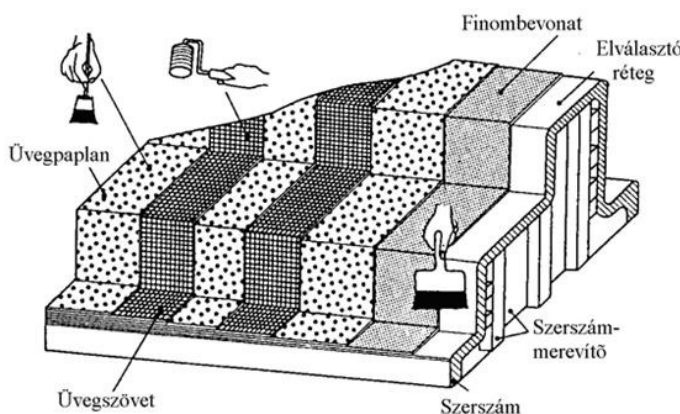
A hőre lágyuló mátrixú, szálerősített kompozitok között különleges helyet foglalnak el az autóipari alkatrész-gyártásban. Ez lényegében üvegszálból és hőre lágyuló polimer (pl. PP, PE, PA, PET...) szálból készült nem-szőtt, (pl. tűnemezelt) kelme („paplan”), amelyet előgyártmányként hoznak forgalomba, s amelyből sajtolással kitűnő kompozit készíthető. A sajtolás során a hőre lágyuló szál megolvad, s többé-kevésbé összefüggő, igen hatékony mátrixot képez.

Az üvegszál más természetes szálakkal is keverhető. A különféle eredetű és funkciójú, hosszú szálak a textilipar hagyományos gépein együtt feldolgozhatók, kártolhatók, tű-nemezelhetők és számos módosítást is kaphatnak. Az előtermék tartósan tárolható és változatos térformájú sajtolat termékké – pl. autó ajtó belső lemezzé – dolgozható fel.

A következőkben a legtipikusabb polimer kompozit-technológiákat, a sűrű térhálós (duromer) mátrix kialakításával együtt járó módszereket, az UP, EP alapú, nagyszilárdságú üveg-, karbon- és aramid-szállal erősített rendszerek gyártási technikáit részletezem. [2]

Laminálás, szórás

Az erősítő rétegek kézzel történő egymásra illesztésével építették fel mintegy ötven éve az első modern polimer kompozit termékeket sorozatgyártásban (lásd: 4.9. ábra). A laminálás során az erősítőrétegeket egymás után felhelyezzük a szerszámra, közben ecsettel felvisszük az erősítő rétegek közé a mátrix anyagot. Négy-hat réteg elkészülte után görgővel kisimítjuk a felületet (buborékokat elűntetjük, hogy ne keletkezzenek zárványok). A kész kompozit lemez állhat akár 20 rétegből is, elérheti a 20 mm vastagságot is, és a konstrukció által megkívánt sarokpontokban tartalmazhat jelentős megvastagítást, megerősítést, bordát, fém-betétet stb. Felépülhet szendvics-lemez formájában is, és mindezzel tág teret ad a konstruktőr kívánalmainak. A réteges felépítés biztosítja a kompozit konstrukció legfőbb műszaki előnyét: a teljes alkatrész, a termék szilárdságát minimális önsúly mellett úgy optimálhatjuk, hogy az igénybevétel erővonalai mentén kapjuk a legnagyobb szilárdságot. A korai kézi laminálás ezen alapelve jut érvényre a mai legigényesebb „high-tech” kompozit termékek az aeronautika és asztronautika eszközeinek gyártási technológiáiban is. A konstrukció feladata tehát a rétegek méretezése, az irányok meghatározása, a rétegrend kialakítása. [1] [2] [3]



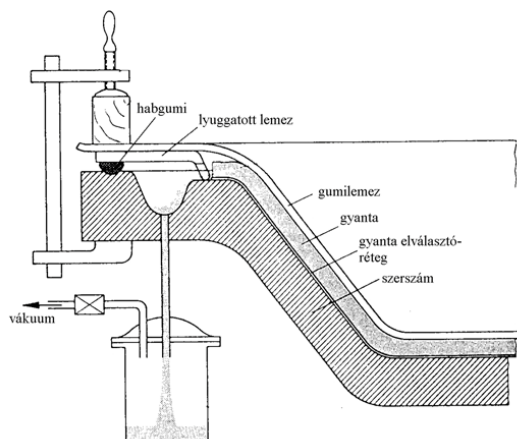
4.9. ábra
Kézi laminálás [2]

Sajtolás (BMC, SMC, GMT)

A laminálás tulajdonképpen *nyomás nélküli* eljárás. A nyomásnak a térhálósítás során jelentős szerepe lehet a mátrix és a szál közti kontaktus, tartós kapcsolat kialakításában. Enyhe nyomóerőt (max. 1 bar) úgy is alkalmazhatunk a térhálósodó kompozit-lemezen, hogy a rugalmas gumilemezzel befedett laminátumot a szerszám felőli oldalon vákuummal megszívjuk. A vákuum maga végezheti a folyékony mátrix-gyantával való feltöltést is, ezt hívjuk vákuum-injektálásos eljárásnak. (lásd: 4.10. ábra)

A térhálósodás végéig alkalmazott vákuum hasonló hatású, mintha a „kikeményítést” $10 \text{ N/cm}^2 = 10^5 \text{ Pa}$ nyomás alatt hajtottuk volna végre. [2]

Természetesen a nyomás alatti eljárásoknál célszerű kétrészes szerszámokat alkalmazni. A vákuum-injektálás is kivitelezhető kétrészes szerszámban. A nagyobb sorozatban gyártott kompozit alkatrészeket (pl. a korszerű kamion-vezetőfülkéket, autóbusz és személyautó karosszériaelemeket) manapság BMC, SMC, és GMT típusú kompozit előgyártmányokból sajtolják. [2]



4.10. ábra

A kompozit vákuum-injektálás alapelve [2]

Tekercselés

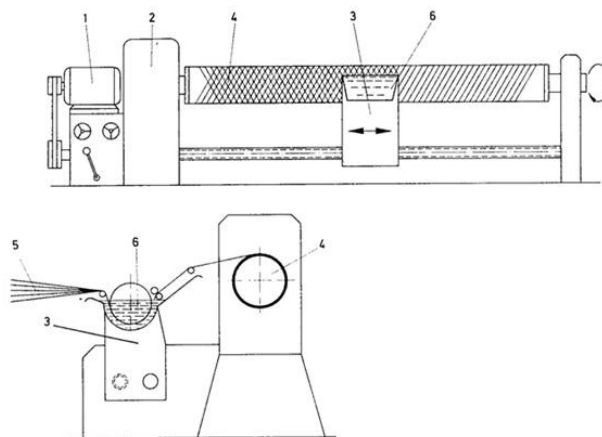
A terhelés kitüntetett irányában történő, anizotrop anyag-erősítés elve, a kompozit konstrukciók alapelve jól érvényesíthető a technika gyakran felhasznált elemei: a nyomásálló csövek ill. tartályok, és az erőátvitelre szolgáló rudak gyártásában. Jól ismert a mechanikából, hogy a nyomásálló csövek, hengeres tartályok héjának terhelése korántsem azonos a cső hosszirányában és arra merőlegesen a hengerpalást területének mentén. [2]

Ezt a jól számítható követelményt jól kielégíthetjük polimer kompozit héjakkal, amelyekben a szálerősítést a kívánt irányban alkalmaztuk. Így kiemelkedően előnyös szilárdság/tömegviszonyú, és különleges követelményeknek is eleget tevő: korrózióálló, robbanásbiztos stb. erősített tartályokat, csöveket, rudakat stb. állíthatunk elő. Az eredeti eljárásban (4.11. ábra) enyhén kúpos magra tekercselik fel az üvegszál köteget (*roving*), amelyet előzőleg a mátrix oligomerrel átitattak. A többszörös oda-vissza tekercselés alakítja ki a többrétegű, több irányban erősített kompozit szerkezetet, amelynek térhálósítása a kúpos magon történik. [2]

Pultruzió

A hosszirányú, folytonos szállal erősített kompozit profilgyártás az extrúzióhoz hasonló eljárás, amelyben a húzásnak (*pulling*) igen nagy szerepe van: a térhálósítás befejeztéig a termék jelentős húzásnak van kitéve. Az erősítőszál hosszirányú kifeszítésének az előnyeit jól ismerjük az előfeszített vasbeton építőelemek kitűnő szilárdsági és rugalmassági adataiból.

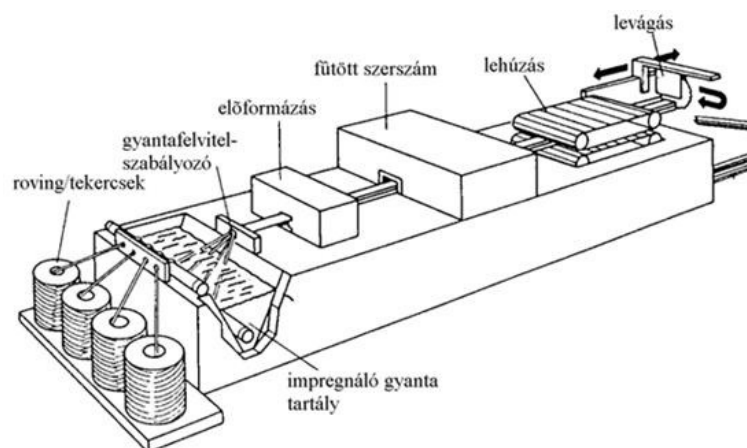
A szálkötegeket az oligomer gyantával való átitatás után egy fűtött szerszámban egyesítjük, és ebben a szerszámban az állandó hosszirányú feszítés mellett meg végbe a mátrixgyanta térhálósítása. A profilgyártó pultrúziós sorok sebessége 1,5–60 m/h is lehet. A profilok lényegében kizárólag hosszirányú erősítőszálai a terméknek igen nagy húzó- és hajlítószilárdságot kölcsönöznek. A termék kritikus tulajdonsága a keresztirányú szilárdság. A szerszám hőmérsékleti kontrollja kulcsfontosságú. A merev készterméket a kívánt hosszúságúra darabolják. Az üvegszálas polészter profilok üvegszál tartalma 55 tömegszázalékig is felmehet. [2]



4.11. ábra

A kompozit tekercselés alapelve [2]

- 1) motor, 2) meghajtás, 3) támaszték, 4) tekercselő túske
5) üvegszál pászmák, 6) impregnáló fürdő



4.12. ábra

A pultrúzió vázlatja [2]

4.3. Polimer mátrixú kompozitok forgácsolása

A műanyagokat akkor szokták forgácsolással alakítani, ha a termékek száma miatt nem éri meg egyedi szerszámot készíteni, vagy ha a méretpontosság betartása túl drága lenne. Annak ellenére, hogy nagy értékű műszaki műanyagoknál viszonylag gyakran használják ezt a megoldást, a többi feldolgozási módszerhez képest nagyon keveset tudunk a műanyagok forgácsolás során mutatott viselkedéséről, és nincsenek jó modellek a folyamatok megjóslására. A műanyagok teljesen másképp viselkednek a forgácsolás során, mint a fémek, hiszen a polimerek alapvetően viszkoelasztikusak. Figyelembe kell venni az időfüggő mechanikai jellemzőket, az idő-hőmérséklet szuperpozíciós elvet és a szilárd állapotban is megjelenő viszkozitás hatását.

Töltött és erősített, hőre lágyuló és hőre keményedő műanyagok fúrása során képződő forgácsok mennyiségét és szerkezetét vizsgálva megállapították, hogy a plasztikus deformáció mértékét az erősítőanyag mennyisége és a mátrix deformálhatósága együtt határozza meg. A fúrt felület széle általában meglehetősen éles, kivéve, ha a nagyon nagy vágási sebesség vagy a kis előtolási sebesség miatt túl sok hő halmozódik fel, ami a vágott felület „elkenődéséhez” vezet. Kompozitok megmunkálása során azt is megfigyelték, hogy a kompozitok készítésének (*konzolidációjának*) módja és körülményei is alapvetően befolyásolják a megmunkálhatóságot és annak minőségét. Extrudált szálerősítésű hőre lágyuló kompozitoknál azt is figyelembe kell venni, hogy a szálorientáció nem egyenletes az extrudált anyag keresztmetszetében: a minta belsejében több az áramlási irányra merőlegesen, a fal mentén pedig az azzal párhuzamosan orientált szál. [4] [5]

Tekintettel a műveletek során keletkező hő rossz elvezetésére és a műanyagok viszonylag alacsony olvadási pontjára, a megmunkálások során nagyon fontos, hogy a keletkező hőt minimális értéken tartsuk, a műanyag alkatrészek "*hő sokkját*" elkerüljük. Így megelőzhető a műanyag felület megmunkálási elszíneződése, megolvadása, ezért: [4]

- a szerszámoknak mindig élesnek és simának kell lennie,
- csak a forgácsoló élnek szabad érintkezni az anyaggal,
- az előtolás a lehető legnagyobb legyen,
- ügyelni kell a forgácseltávolításra,
- hűtés alkalmazása javasolt, főleg a nagy hő keletkezéssel járó megmunkálásoknál. (pl. fúrás).

Forgácsolási erők

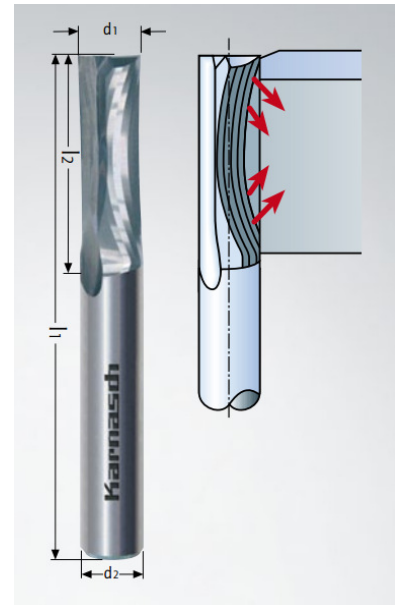
Mivel a polimerek forgácsolásakor az erő kisebb, mint a fémeknél, így az anyagok befogásakor a rögzítő erő (nyomás) szintén csökkenthető. [4] A fémekhez képest kisebb szilárdság, merevség miatt figyelni kell arra, hogy a forgácsolási erő ne befolyásolja a megmunkálás pontosságát. A laminált rétegek a túl nagy és kedvezőtlen irányú forgácsoló erők miatt elválhatnak egymástól. Erre a szerszám választása és a technológia tervezése során figyelniünk kell!

Forgácsoló szerszámok -marás-

Hasonló a hagyományos fém, bizonyos esetekben famegmunkáló szerszámokhoz: a szénacél, gyorsacél és keményfém egyaránt alkalmazható. Szénszállal erősített kompozit megmunkáló szármarók láthatóak a 4.13. és 4.14. ábrákon.



4.13. ábra
JC845 nagyoló szerszám forgácstörővel [7]



4.14. ábra
Delamináció elkerülése [8]

A megmunkálások során jelentkező **delaminációt** (a szénacél erősített rétegek egyenkénti leválását) is tudatosan kell megelőzni. Ezen problémákra a megoldást a kemény és éles, tömör keményfémből készült, különleges bevonattal ellátott szerszámok jelentik. [7] A 4.13. ábrán látható szerszám spirálszöge kicsi, továbbá egy szerszámon jelentkezik a jobb és bal spirálú szerszámkialakítás. Ezzel a geometria kialakítással rendelkező szerszámokat kompressziós szármaróknak nevezik. A geometriai kialakítás célja, hogy a forgácsolási erőket az anyag közepére koncentrálják (4.14. ábra), ezzel a laminált rétegek nem tudnak szétválni. Ezekkel a szerszámokkal sokkal szabadabban tervezhetjük a gyártástechnológiát.

Általában a mátrixanyag olvadáspontja határozza meg a maximális forgácsolási sebességet, míg az előtolást az erősítőanyag mennyisége, orientációja és szakító szilárdsága határozza meg. [7]

A MoS₂ és üvegszál erősítésű hőre lágyuló műanyagokhoz a hosszú élettartam érdekében különösen javasolt a gyorsacél és a keményfém vagy a gyémántbetétes szerszámok használata. A fúró- és maró műveletek esetén a repülő gépipari gyártók is legtöbbször tömör keményfém és/vagy tömör szerszámokat használnak. Ebben az iparágban a megmunkálások során a lehető legjobb minőség elérése a cél, amit gondosan kialakított folyamatellenőrzéssel érnek el. Az alkatrészek darabonkénti előállítási költsége is szempont, de a tökéletes minőségű alkatrész legyártása szinte minden esetben elsőbbséget élvez, és a termelékenység növelése csak másodlagos. [4] [6]

A műanyagot forgácsoló szerszámokra általánosságban igaz, hogy mindig tökéletesen élesnek kell lennie, különben a technológiai hibák sorozatát indítja el az életlen szerszám: nagyobb súrlódási hő, anyag kilágyulása- olvadása, egyenetlen fogás és felület, élrátét keletkezés, nehezen eltávolítható forgács.

A keményfém, kerámia vagy gyémánt szerszámok használata általában hosszabb szerszámélettartamot jelent és különösen előnyös a szén és üvegszál, ásványi anyag erősítésű kompozitoknál, valamint a HPM anyagok közül a CELAZOLE® PBI és TORLON® PAI anyagoknál, ha a szerszámélezés is megoldott. [6]

Kennametal szerszámgyártó által kifejlesztett egyedi geometriájú polimer kompozit megmunkáló szerszámok láthatóak a 4.15. ábrán.



4.15. ábra

Kennametal kompozit megmunkáló szerszámok [9]

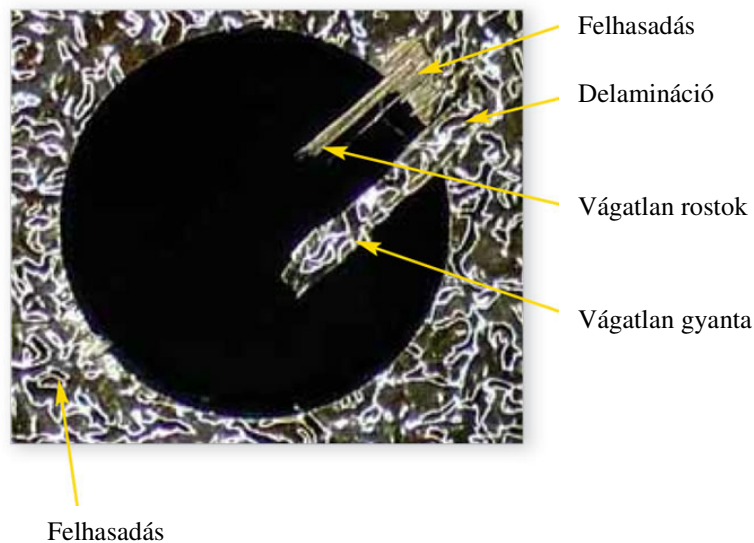
1) Horonymaráshoz, 2) Jó felületi min., üveg erősítőszálhoz, 3) Profilázáshoz, 4) Palástmaráshoz

Megmunkálási kihívások fúrásnál

Szálerősített polimer mátrixú kompozitok fúrása során a jellemző nehézségek és problémák a következők: [9]

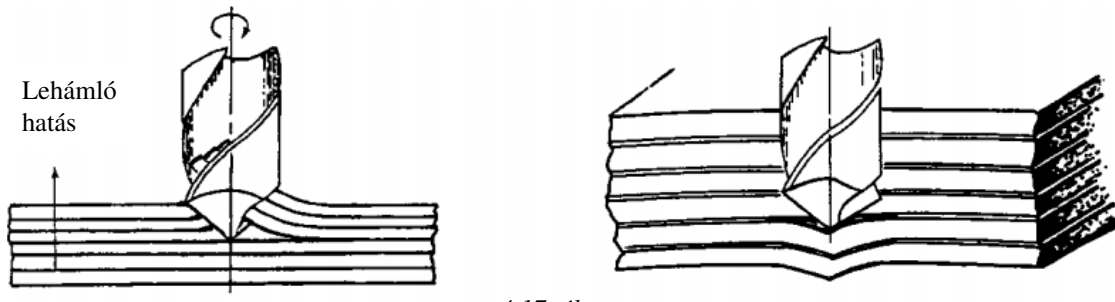
- Delamináció
- Vágatlan rostok, vágatlan gyanta
- Kitöredezés

Az felsorolt furathibák jellemzően a szálerősített polimer kompozitoknál jelentkeznek (4.16. ábra). Azt azonban ne felejtsük el, hogy a klasszikus furathibák (*alak, merőlegesség, felületi érdesség, pozíció stb.*) itt is megtalálhatóak, de azokra most nem térek ki.



4.16. ábra
Jellemző furathibák [9]

Az első használható modellt a delamináció leírására *Hocheng és Dharan* javasolta. [11] A 4.17. ábra illusztrálja vázlatosan azt a két esetet, amikor a delamináció erőteljesen jelentkezik: a belépő és kilépő régiókban. A Hocheng-Drahan model megmutatta, hogy a kritikus döfési erő a delamináció kezdetekor összefüggött a még át nem fúrt vastagsággal és a munkadarab anyagával, különösen a kötött roncsolt vastagsággal. Ők tehát azt sugalmazták a modelljükkel, hogy mérni kell a fúrógépen a döfési erőt és visszacsatolással maximalizálni tudjuk a termelékenységet. Ezt a modellt azóta többen csiszolták, például ortotróp anyagjellemzőket adtak hozzá.[12]



4.17. ábra
Delamináció modellje [11]

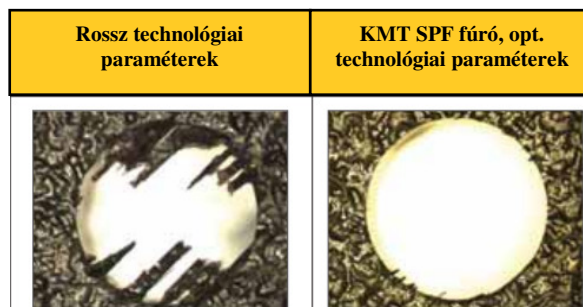
A jellemző furathibák csökkentésének lehetőségei a szerszám oldalról: [9]

- Éles forgácsoló élek használata.
- A pozitív geometria, ami a feszültséget minimalizálja, delaminációt okozhat.
- Hegyes fúró, hogy a lokalizált elemi szálakat is elvágjuk
- 4A forgács eltávolítása nem lényeges, de a keletkezett port el kell tüntetni.



4.18. ábra

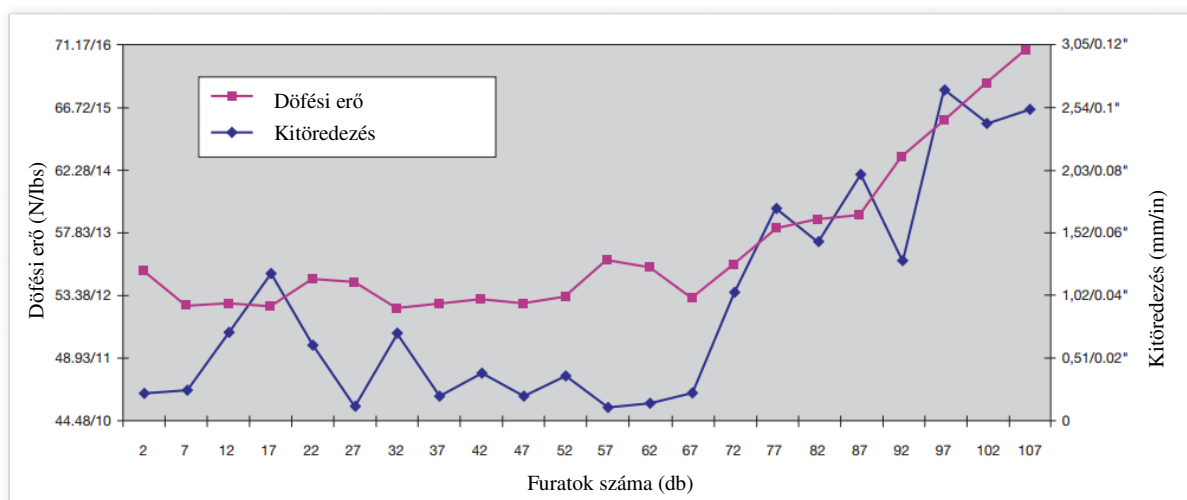
Nagy sebességű kamera felvétele delaminációról
CFRP megmunkálása során [9]



4.19. ábra

Helytelen és megfelelő fúrási stratégiával
készült furatok képei [9]

A 4.18. ábrán látható egy nagysebességű kamera pillanatképe a delaminációról. CFRP jelentése: Szénszál erősítésű polimer (*Carbon-Fiber Reinforced Polymer*). A döfési erő és a kitöredezés kapcsolatát mutatja a 4.20. diagram. Vízszintes tengelyen a furatok száma található, a baloldali függőleges tengelyen a döfési erő (Belépéskor ébredő maximális axiális erő), míg a jobboldalin a kitöredezés nagysága áll. [9]

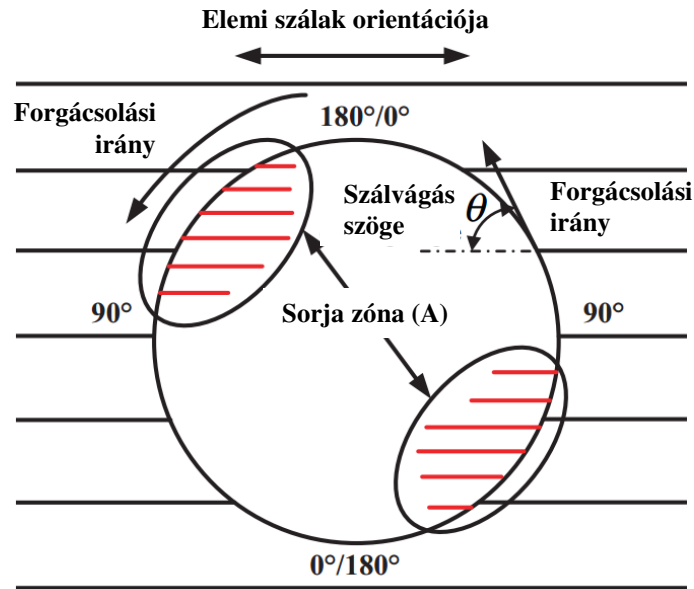


4.20. ábra

Döfési erő kontra delamináció [9]

Habár a diagramon látható, hogy a kék és a rózsaszín görbe egymással korrelál, úgy tűnik, hogy a delamináció más faktoroktól is függ. Pl.: rost mennyiség, orientáció, zárványok és anyaghibák, anyagtulajdonságok stb. A 4.19. ábrán látható egy optimális és egy helytelen fúrási technológiával készült furatkép. [9]

A CFRP fúrásnál keletkező sorja mennyisége a kilépő élen felállít egy bizonyos karakterisztikát a furat kerülete mentén, amely magas szinten függ az elemi szálvágó szögtől (θ - A vágási és az elemi szálak orientációját mutató irányok által bezárt szög), ahogyan a 4.21. ábra is mutatja. A sorja zóna (A) egyfajta objektív indikátorként is használható a kilépő éleken keletkező sorja méretének meghatározásához. [18]

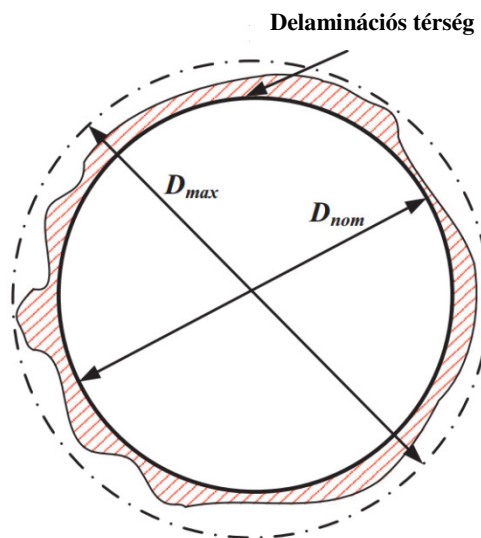


4.21. ábra

Az elemi szálak és a vágási sebességvektor helyzete [18]

A Delamináció faktor (F_d) egy egydimenziós mutatószám, amivel jellemezni tudjuk a delamináció mértékét. [18] A delamináció faktort megkapjuk a delamináció hatáskörzetének (Delamination area) maximális (D_{max}) és nominális (D_{nom}) átmérőjéből (4.22. ábra):

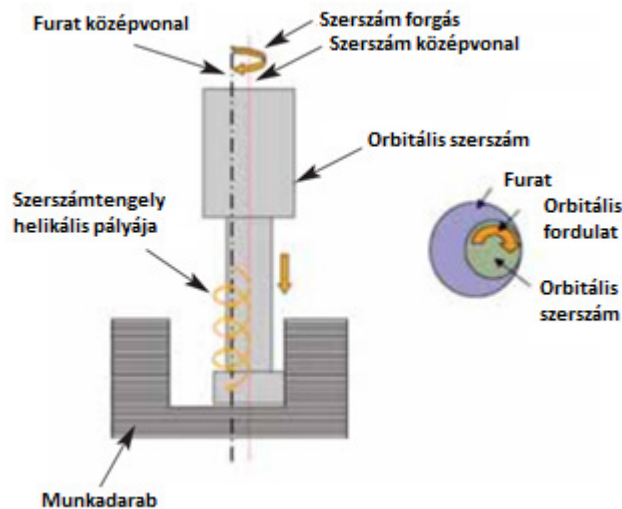
$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$$



4.22. ábra

Sematikus ábra a delaminációs faktor értelmezéséhez [18]

A furatot csavarvonal interpolációval is lehet gyártani. A 4.22. ábrán látható a csavarvonal interpoláció elvi vázlata. Szembetűnő különbség a fémmegmunkáláshoz képest, hogy a szerszám szár átmérője kisebb a forgácsoló geometria átmérőjénél. Ennek az oka, hogy csökkentjük a súrlódó felületeket, ezzel csökkentjük a keletkező hő mennyiségét. A csavarvonal interpolációval készült furatot a 4.23. ábra hasonlítja össze hagyományos csigafúróval készült furattal.



4.22. ábra
Csavarvonal interpoláció elvi vázlat [9]



4.23. ábra
Csavarvonal interpoláció kontra hagyományos fúrás
Conventional: Hagományos;
Orbital: Csavarvonal interpoláció [9]

Kompozit fúrásra csigafúró és csavarvonal interpolációhoz fejlesztett szerszám látható a 4.24. ábrán. A csigafúró csúcsszőge jellemzően 90° vagy kisebb.



4.24. ábra
Csigafúró (balra) és szármaró (jobbra) [9]

Hűtés – kenés

Hűtés-kenés nem minden esetben feltétlenül szükséges és nem minden esetben alkalmazható (*kémiai reakcióba lép a mátrixanyag a hűtő-kenő folyadékkal*), használatával a polimerek túlmelegedése elkerülhető. Nagy forgácsolási hő keletkezése esetén (*pl. fúrás csigafúróval, leszűrő esztorgálás stb.*), valamint az optimális felületi érdesség egyenletes tartása érdekében, szűk megmunkálási tűrésmezők esetén szükséges lehet a hőelvezetés. Általában a különböző olajos emulziók, hűtő-kenő folyadékok előnyösen használhatók. Azoknál az anyagoknál nem javasolt a használatuk, melyek érzékenyebbek, hajlamosabbak a feszültségrepedés kialakulására (*pl. PC, PEI és PSU*). Ezeknél az anyagoknál megfelelő megoldást jelenthet a tiszta víz vagy sűrített levegő alkalmazása. [4]

Abban az esetben, ha a vízbázisú olajos emulziók használata nem kerülhető el az amorf anyagok (*PC, PEI, PPSU, PSU*) megmunkálása során (*pl. nagyméretű furat fúrása*) a forgácsolás befejeztével a munkadarabot sürgősen meg kell tisztítani izopropil-alkohollal, majd ezután tiszta vízzel. Így a feszültség-repedés kialakulásának veszélye csökkenthető.

Ha légfúvót alkalmazunk hűtésre, megfelelő irányítással segítséget nyújthat a forgácseltávolításban is, megelőzve a forgács munkadarabra és szerszámmra tekeredését. Sok esetben csak a levegővel való hűtés az egyedüli megoldás, mert vannak olyan polimer mátrixok, amik hajlamosak a nedvességet felszívni.[4]

5. Szén-szállal egy irányban erősített polimer kompozit forgácsolhatósági vizsgálata

Az előző fejezetben bemutattam néhány polimer kompozit előgyártási technológiát, továbbá összefoglaltam a szálerősített polimer kompozitok forgácsolásáról (*részletesebben a fúrásról*) a nemzetközi irodalomban összegyűlt információkat. A kutatás következő fázisában a forgácsolt furatok hibáit szeretném csökkenteni alkalmasan választott fúrási stratégiával. A szükséges kísérleteket a kísérlettervezés módszerével készítettem elő.

5.1. Kísérletterv készítése

A kísérlettervezés célja, hogy összeállítsak egy olyan dokumentumot, ami alapján a vizsgálandó faktorok hatása a forgácsolhatóságra viszonylag kevés kísérlettel elemezhető. A vizsgálandó faktorok a következők:

- Előtolási sebesség (F [mm/ford])
- Forgácsolási sebesség (v_c [m/min])
- Szerszám (T)

A fúrási kísérleteket egy 115x57,5x25 [mm] CFRP előgyártmányon fogom elkészíteni. A munkadarab alkatrészrajza a 13. sz. *mellékletben* található. A kísérletek során kétfajta szerszámot fogok alkalmazni:

- CFRP anyaghoz fejlesztett speciális fúrószerszám (Seco: SD205A-6.38-34-8R1-C1)
- CFRP anyaghoz fejlesztett speciális szármaró (Seco: 880100R020Z4.0-DURA)

A Seco szerszámkatalógus által ajánlott technológiai paraméterintervallum alapján terveztem meg a kísérleteket.

A fúrásokat a 3. fejezetben már bemutatott Kondia 3D-s marógépen fogom majd elvégezni. A kísérletek előtt azonban még meg kell oldani a forgács eltávolítás problémáját. A 8 mikrométer átmérőjű abrazívan erősen koptató hatású szénszálak ha bekerülnek a szánvezetékek közé, akkor onnan nagyon nehezen távolíthatóak el. Az iparban már használnak olyan berendezéseket, amik a megmunkálás előtt elszeparálják a fúrási zónát a szerszám gép munkaterétől, és az elkülönített térfogatból elszívják a keletkező forgácsot. Ilyen esetben nem lehet hűtést alkalmazni.

Az összeállított kísérlettervet mutatja az 5.1. táblázat.

Kísérletterv CFRP fúrás 2014					
Ssz.	Szerszám	Forgácsolási sebesség	Előtolási sebesség	Koordináták	
	T	v_c	F	x	y
	[]	[m/min]	[mm/ford]	[mm]	[mm]
1	Fúró	65	0.03	-11.25	11.3
2			0.05	-11.25	28.8
3			0.07	-11.25	46.3
4			0.08	-11.25	63.8
5		95	0.03	-11.25	81.3
6			0.05	-11.25	98.8
7			0.07	-28.75	11.3
8			0.08	-28.75	28.8
9		135	0.03	-28.75	46.3
10			0.05	-28.75	63.8
11			0.07	-28.75	81.3
12			0.08	-28.75	98.8
13	Szármaró	300	0.30	-46.25	11.3
14			0.40	-46.25	28.8
15			0.50	-46.25	46.3
16		350	0.30	-46.25	63.8
17			0.40	-46.25	81.3
18			0.50	-46.25	98.8

5.1. táblázat
Kísérletterv CFRP fúráshoz

A táblázatban látható paraméterek a szerszámgyártó által megadott technológiai intervallumból vett fúrószerszám esetében négy, szármaró esetében három egyenletesen kiragadott diszkrét pontjai. Az iparban is ezeket a forgácsolási paramétereket használják, így a kísérletek alapján levont következtetések relevánsak lesznek.

A TDK dolgozatom beadási határidejéig a CFRP kísérlettervét és a kísérlet alapanyagául szolgáló munkadarab gyártását tudtam elvégezni. A következő fejezetben az előgyártási folyamatról fogok írni.

5.2. Előgyártmány készítése a kísérletekhez

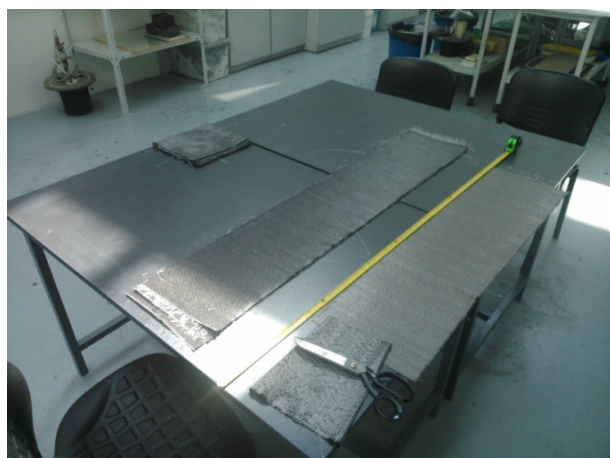
A kísérletekhez szükséges munkadarabot két műveletben gyártottam le:

1. Kézi laminálás
2. Vízvágás

A laminálást a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem „MT” épületében, a Polimer technika laboratóriumban, míg a vízvágást a Woldem Kft. műhelyében végeztem el.

Kézi laminálás

A kézi laminálás technológiáját már ismertettem a 4.2. *fejezetben*. A feltekercselt szénzál kötegből először csíkokat, majd azokat további öt téglalap alakú szövetté vágtam össze (5.2. *ábra*). Összesen 55 darab 200x200 [mm] szövet készült, amiket FM20 MR3124 epoxi gyantával (500 g gyantához 175 g térhálósító) lamináltam. A laminálás során a szénzál szövetet úgy helyeztem, hogy egyirányú legyen az erősítés. A laminálási folyamat utolsó zárványmentesítését láthatjuk az 5.3. *ábrán*⁹. A laminálás után a munkadarabot két üveglap közé helyeztem és egy napig 100 [kg] össztömeggel terheltem. A terhelés után 60 °C -ra fűtött kemencében 4 órán keresztül hőkezeltam. Ezzel a technológiával az erősítőszálak orientáció hibája és a zárványmentesség nem tartható olyan alacsony szinten, mint az automatizált technológiáknál. Az ily módon elkészült egy irányban szénszállal erősített polimer kompozitról 90 szeres nagyítással mikroszkópos felvételeket készítettem, hogy minősítsem a kézi laminálással készült munkadarab minőségét. (*lásd később*)



5.2. *ábra*
Szénzál köteg csíkok



5.3. *ábra*
Laminálás a PTT laboratóriumban

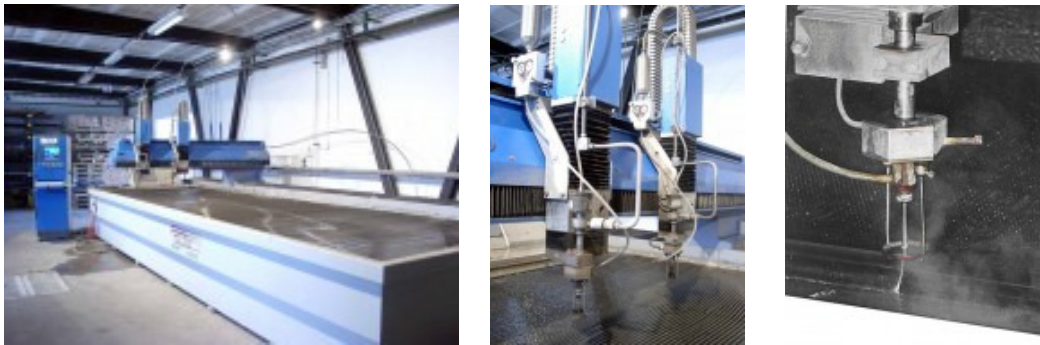
⁹ A képen én vagyok látható.

Vízvágás

A vízvágás igen nagy előnye más vágási technológiákkal szemben, hogy nagy pontosságú hidegvágási eljárás, melynek eredményeképpen a felület mentén a megégés és beolvadás veszélye megszűnik. A vágás során alkalmazott technológiai paraméterek:

- Előtolás: $F=400$ [mm/min]
- Nyomás: $p=3600$ [bar]
- Gránit homok mennyisége: $q=340$ [g/min]

Azért volt erre a technológiára szükség, mert a 25 [mm] vastagságú polimer kompozitot a Polimer technika Tanszék (PTT) gyémánt tárcsás daraboló gépe nem tudta elvágni. Az alkalmazott CNC vízvágó gépről készült képek láthatóak az 5.4. ábrán.

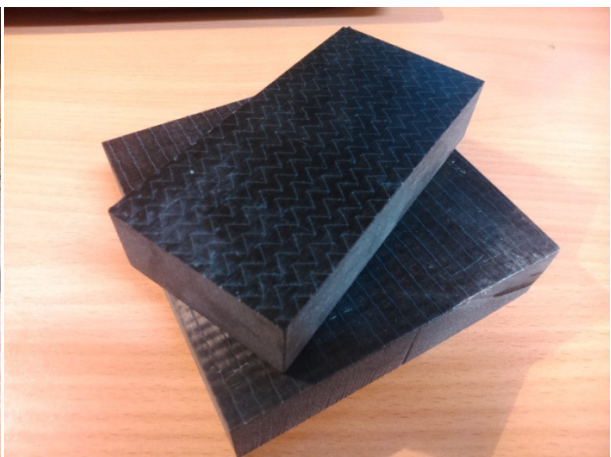


5.4. ábra
CNC vízvágó gép a Woldem Kft.-nél

Laminálás során a munkadarab szélén keletkezett, használhatatlan minőségű, inhomogén anyagot (5.5. ábra) távolították el, illetve az erőmérő cellába befogható mérettartományhoz igazított méretek alapján darabolták a kísérleti alapanyagot. (5.6. ábra)



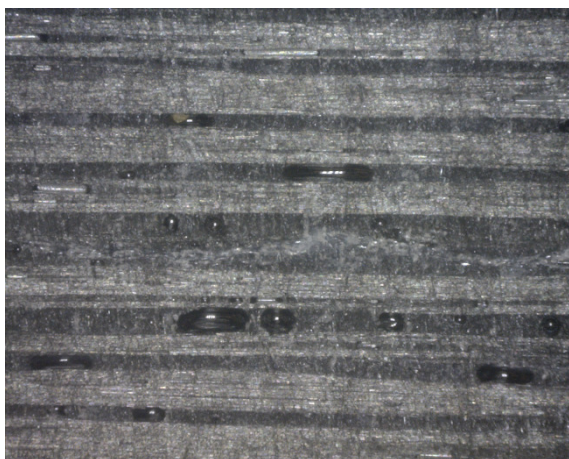
5.5. ábra
Használhatatlan, CFRP hulladék



5.6. ábra
Méretre vágott kísérleti CFRP alapanyag

A laminált rétegek vizsgálata digitális mikroszkóppal

A 3.1. fejezetben azonos digitális mikroszkóppal készítettem a munkadarab vízvágás utáni állapotáról néhány fényképet. Az 5.7. és 5.8. ábrák az erősítő száliránnyal párhuzamos illetve merőleges síkokról készültek. Látható, hogy a zárványok mennyisége és nagysága az elemi szálak átmérőjéhez képest elenyésző. Forgácsoláskor a zárványok hatását így nem fogom figyelembe venni.



5.7. ábra
Száliránnyal párhuzamos CFRP felület

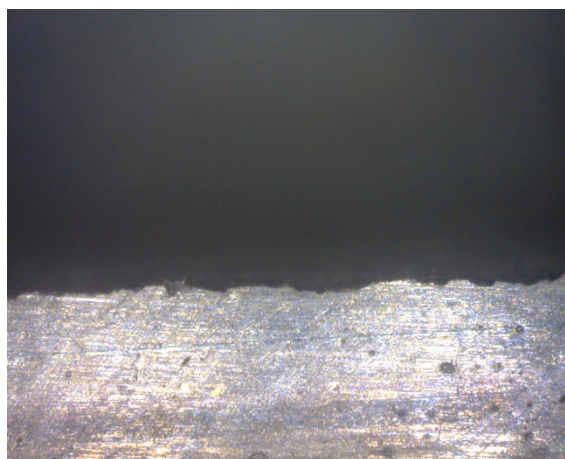


5.8. ábra
Szálirányra merőleges CFRP felület

A vízvágott munkadarab élei a vízszugár belépő (5.9. ábra) és a kilépő (5.10. ábra) zónájában különböznek. A belépő él kissé lekerekített, míg a kilépő él barázdás. Ezeknek az éleknek nincsen jelentőségük és befolyásuk a fúrési kísérletekre, azonban a tervezett CFRP megmunkálhatóságát összefoglaló dokumentumban elemzem majd a vízvágott felületi és él minőségeket is.



5.9. ábra
Belépő vízszugár által kialakított él



5.10. ábra
Kilépő vízszugár által kialakított él

6. Összefoglalás

A TDK munkám első részében alumínium ötvözet forgácsolhatósági jellemzőit vizsgáltam, hogy később összehasonlítási bázisként tudjam használni a polimer kompozit megmunkálás jellemzőinek kiértékeléséhez. A kísérletek kiértékelése során bevezettem a *főforgácsoló erő változás intenzitásának maximumát (FEVIM)*, mint technológiát minősítő mennyiséget. Kiértékeltem a kísérleti faktorok hatását a főforgácsoló erőre, a FEVIM-re, a felületi érdesség egyes mérőszámaira, az alakhibákra, a sorjásodásra és az él menti kitöredezésekre.

A TDK dolgozatom második részében áttekintettem a polimer kompozitok forgácsolhatóságára vonatkozó nemzetközi szakszakirodalmat, továbbá összeállítottam egy kísérlettervet, ami alapján a kutatás következő fázisában vizsgálni tudom a kézi laminálással gyártott, majd vízvágott CFRP forgácsolt furatmegmunkálása során jelentkező tipikus problémák okait és megoldási lehetőségeit.

A kutatás következő fázisában az elkészült kísérletterv alapján fogom a kísérleteket elvégezni a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány és -technológia Tanszék műhelyében.

7. Köszönetnyilvánítás

Elsőként szeretnék köszönetet mondani a konzulensemnek, Mátyási Gyula tanár Úrnak, hogy lelkiismeretesen segített mind a szakmai ismeretek elmélyítésében, mind a kísérletek lebonyolításában.

Szebényi Gábor tanár Úrnak szeretném megköszönni a polimer kompozit laminálásban nyújtott rengeteg segítségét is rám szánt idejét.

Szeretnék köszönetet mondani a Gyártástudomány és –technológia Tanszék vezetőjének, Szalay Tibor tanár Úrnak, hogy támogatta a kísérleteket alapanyagokkal és szerszámokkal.

Köszönöm Czampa Miklós doktorandusz Úrnak a rengeteg segítségét a koordináta mérés technika területén, Bíró István doktorandusz Úrnak a felületi érdesség mérés lebonyolításában, Hartmann Tamás hallgatótársamnak a polimer kompozitok előgyártmány gyártástechnológiai fejezetben kidolgozásában nyújtott segítségét.

Végül szeretném megköszönni Gyúros Istvánnak, a Woldem Kft. műszaki igazgatójának a vízvágás elméleti ismereteinek átadását és azt, hogy a kísérletekhez szükséges polimer kompozit előgyártmány vízvágását megoldotta.

8. Irodalomjegyzék

- [1] Belina Károly: Műanyagok a gépjárműiparban, 2012. <http://www.tankonyvtar.hu/>
- [2] Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János: A polimertechnika alapjai, 2007. <http://www.tankonyvtar.hu/>
- [3] Dr. Varga Csilla: Műanyag kompozitok, 2012. <http://www.tankonyvtar.hu/>
- [4] <http://www.quattroplast.hu/technologia/muszaki-muanyag-feltermekekforgacsolasa/kiadvany/2>
- [5] Quadrini, F.; Squeo, E. A.; Tagliaferri, V.: Machining of glass fiber reinforced polyamide. = eXPRESS Polymer Letters, 1. k. 12. sz. 2007. p. 810–816. Schöffler, K.: Restlos aufgeteilt. = Plasverarbeiter, 58. k. 2007. 4. sz. p. 18–19.
- [6] Teun Van Asten, Engineer Marketing Services, Wilco van den Boogaard, Application Engineer Solid Milling, Pär Nordberg, R&D and Project Engineer, Seco Tools
- [7] <http://www.cnc.hu/2013/12/nagy-kihivast-jelento-anyagok-marasa-es-furasa-i/>
- [8] KARNASD kompozit forgácsoló szerszám katalógus. www.karnasch.de
- [9] KENNAMETAL kompozit forgácsoló szerszám katalógus. www.kennametal.com
- [10] Szabó R., Szabó L. :Textilszálak kompozitok megerősítésére. Magyar Textiltechnika LXIV. Évf. 2011/4 180.
- [11] Ho-Cheng, H., and Dharan, C. K. H., 1990, “Delamination During Drilling in Composite Laminates,” ASME J. Eng. Ind., 112, pp. 236–239.
- [12] Jain, S., and Yang, D. C. H., 1994, “Delamination-Free Drilling of Composite Laminates,” ASME J. Eng. Ind., 116, pp. 475–481.
- [13] Horváth Miklós és Markos Sándor szerk.: Gépgyártástechnológia, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, jegyzet 2009.
- [14] <http://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/forg4.htm>
- [15] Szalayné Kovács Eszter: Fúrás. http://www.kepzesevolucioja.hu/dmdocuments/4ap/5_0111_022_101215.pdf
- [16] Markos Sándor: Fúrószerszámok. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Előadásjegyzet 2013.

- [17] Sandvik Coromant fúró katalógus. <http://www.drillingknowledge.com/campaign-drilling/>
- [18] Jinyang Xu, Qinglong An, Ming Chen: A comparative evaluation of polycrystalline diamond drill sin drilling high-strenght T800S/250F CFRP. *Composote Structures* 117 (2014) 71-82.
- [19] HARDOX WEAR PLATE szerszámgyártó. <http://www.hardox.com/Handling/Machining1/>
- [20] Geier Norbert: Átfogó CAM gyakorlat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyakorlati útmutató. 2013.
- [21] H. SASAHARA, M. KAWASAKI and M. TSUTSUMI: Helical Feed Milling with MQL for Boring of Aluminum Alloy. *Journal of Advanced Mechanical Design, and Systems, and Manufacturing*, Vol. 2, No. 6, 2008
- [22] D.U. Braga, A.E. Diniz, G.W.A. Miranda, N.L. Coppini: Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool int he drilling of aluminium-silicon alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 122 (2002) 127-138.
- [23] Kevin A. Calzada, Shiv G. Kapoor, Richard E. DeVor, Johnson Samuel, Anil K. Srivastava: Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber- reinforced polymer composites. *Journal of Manufacturing Processes* 14 (2012) 141-149.
- [24] E. Brinksmeier, R. Janssen: Drilling of Multi-Layer Composite Materials consisting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), Titanium and Aluminum Alloys. Faculty of Production Technology, Division of Manufacturing Processes Bremen, Germany.
- [25] A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda, T. Furumoto: High-quality machining of CFRP with high helix end mill. *CIRP Annals- Manufacturing Technology* 63 (2014) 89-92.
- [26] Vikki Franke: Drilling of long fiber reinforced thermoplastics- Influence of cutting edge ont he machining results. *CIRP Annals- Manufacturing Technology* 60 (2011) 65-68.
- [27] M. Rahman, S. Ramakrishna, J.R.S. Prakash, D.C.G. Tan: Machinability of carbon fiber reinforced composite. *Hournal of Materials Processing Technology* 89-90 (1999) 292-297.

9. Melléklet jegyzék

Ssz.	Megnevezés/Rajzsám	Méret	Megjegyzés
1.	Paraméteres CNC programok	A4	
2.	Forgácsolási paraméterek 1.	A4	
3.	Forgácsolási paraméterek 2.	A4	
4.	Mérési dokumentációk	A4	a) 1-22 furatok körkörösség $z=2$ b) 1-22 furatok körkörösség $Z=10$ c) 1-22 furatok merőlegesség d) 2.1-2.3. furatok körkörösségek és merőlegesség
5.	Mikroszkóppal készült képek	A4	Szétvágás előtt
6.	Felületi érdesség kiértékelés	A4	Táblázat
7.	Felületi érdesség ábrázolása	A4	Grafikonok és képek
8.	Erő és geometriai hibák kiértékelés	A4	Táblázat
9.	Erő és geometriai hibák ábrázolása	A4	Grafikonok és képek
10.	Összefoglaló diagramok	A4	
11.	Alkatrész egyes állapotai	A4	
12.	Kiértékelés összefüggései	A4	
13.	CFRP alkatrészbrajz	A4	
14.	Kísérletterv	A4	táblázat

10. Melléklet