

TIMA TAMÁS SÁNDOR
TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK



TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK

TIMA TAMÁS SÁNDOR
TDK DOLGOZAT

**Szénszállal erősített polimer kompozitok többtengelyes élmarási
technológiájának fejlesztése és kísérleti vizsgálata**

Konzulens:

Dr. Geier Norbert
adjunktus

Budapest, 2022

Szerzői jog © Tima Tamás Sándor, 2022.

NYILATKOZAT AZ ÖNÁLLÓ MUNKÁRÓL

Alulírott, *Tima Tamás Sándor* (M1Z8BJ), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezü 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, 2022.11.07.

Tima Tamás Sándor

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó.....	ii
Jelölések jegyzéke.....	iii
1. Bevezetés	1
2. Szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozit forgácsolhatósága	3
2.1. Imbolygó marás.....	3
2.2. CFRP élmarására irányuló kutatások.....	4
3. Kísérleti körülmények, eszközök és módszerek	7
3.1. Kísérlettervezés.....	7
3.2. Kísérleti környezet	9
3.2.1. Forgácsoló környezet.....	9
3.2.2. Sztereomikroszkópos vizsgálati környezet.....	10
3.3. Kísérlet előgyártmánya	11
3.4. Kísérlet NC kódja	11
4. Kísérlet elvégzése.....	14
5. Eredmények.....	17
5.1. Képfeldolgozó algoritmus	17
5.2. Képszélesség kompenzációja.....	19
5.3. Fajlagos élhossz és élhossz számítása	21
5.4. Fogásszélesség és előtoló sebesség hatása	23
5.5. Technológiák összehasonlítása	25
6. Összefoglalás	28
7. Jövőbeli kutatási célok és tervek.....	29
8. Felhasznált források.....	30
9. Mellékletek.....	32
9.1. Kísérleti jegyzőkönyv	32
9.2. Kísérlet CNC kódja	36
9.3. Képfeldolgozó algoritmus kódja.....	39

ELŐSZÓ

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok széles körben terjedtek el, hiszen kis relatív sűrűségük mellett nagy szilárdsággal rendelkeznek az erősítőszálak irányában. Az ilyen típusú kompozit anyagokat többek között a repülőgép-, hadi-, jármű- és űripar is előszeretettel használja kedvező tulajdonságai miatt. A szénszállal erősített kompozitok többségét valamilyen automatizált, sokszor vákuummal támogatott laminálási technológiával készítik el. Ezzel a gyártási eljárással azonban nem lehet olyan pontos méret- és alakbeli követelményeket (pl.: furatok, üregek, élek) biztosítani, mint amilyeneket a fejlett iparágak megkövetelnek. Ezért van szükség a CFRP kompozitok forgácsolására, amely nagy kihívásokat állít fel elsősorban az anyag inhomogenitása és anizotrópiája miatt...

* * *

Elsősorban szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Geier Norbertnek a TDK dolgozatom kidolgozásában, a kísérletekben és a mérések lebonyolításában nyújtott segítségét.

Köszönöm Poór Dániel Istvánnak az előgyártmányok pontos elkészítését.

Nagyon szépen köszönöm Lukács Tamásnak a kísérletek során nyújtott segítségét.

Köszönöm az Anyagtudomány és Technológia Tanszék munkatársainak a mikroszkópos felvételek elkészítésében való segítségét, kiemelten Kemény Alexandra doktorandusz-nak.

Szeretném megköszönni családomnak a támogatásukat, biztatásukat és türelmüket.

Továbbá köszönöm a tudományos projekteknek, melyek támogatták kutatásaimat. Ezek a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal OTKA-PD20-134430 azonosítószámú projektje, a Kínai és Magyar tudományos és technológiai együttműködést ösztönző 2019-2.1.11-TÉT-2020-00203 támogatás, a Kínai és Magyar tudományos és technológiai együttműködést ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051 támogatás és az USA és Magyar tudományos és technológiai együttműködést ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00050 támogatás.

Budapest, 2022.11.07.

Tima Tamás Sándor

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és angol nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a_e	fogásszélesség	mm
a	illesztett egyenes meredeksége	1
D	szerszámtérő	mm
H	hosszkorrekció	mm
$L_{valós}$	valódi kompenzált képszélesség	pixel
$L_{fajl.}$	fajlagos élhossz	1
$L_{fajl.átl.}$	fajlagos átlagos élhossz	1
$N_{fehér}$	fehér képpontok száma	pixel
n	fordulatszám	1/min
v_f	előtoló sebesség	mm/min

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α	illesztett egyenes meredeksége	°
β	horonyszög	°
φ	letörés nagysága a többtengelyes palástmarás során	°

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
i	általános futóindex (egész szám)

Rövidítések, mozaikszavak

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
CFRP	szénszállal erősített polimer
NC	numerikus vezérlés

1. BEVEZETÉS

A kompozit anyagok két fő fázisból épülnek fel, egy mátrixanyagból és egy erősítőanyagból. A két fázis bármely nagyobb anyagcsoportból felépülhet (fém, kerámia, polimer). A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok esetében az erősítőanyag szerepét a szénszál, míg a mátrixanyag feladatát leggyakrabban hőre keményedő polimer látja el. A CFRP polimer kompozit anyag szerkezetének felépítése a 1.1-es ábrán látható.



1.1 ábra CFRP polimer kompozit összetétele

A CFRP kompozitok széles körben terjedtek el, hiszen kis sűrűségük mellett nagy szilárdsággal rendelkeznek az erősítőszálak irányában.[8] Az ilyen típusú kompozit anyagokat többek között a repülőgép-, hadi-, jármű- és űripár is előszeretettel használja kedvező tulajdonságai miatt. Ilyen ipari példákat láthatunk a 1.2-es és 1.3-as ábrán.



1.2 ábra Boeing 787 [3]



1.3 ábra BMW motorháztető

A CFRP kompozitok nagy többségének előállítása laminálással történik, amely során a szénszálakat behelyezik a mátrixanyagba.[8], [15] Ezen eljárás során azonban nem, vagy csak nagy energia- és költségbefektetés árán lehet tűrt furatokat, éles sarkokat, pontos oldalakat készíteni. Ezért azon termékeket, amelyek CFRP kompozitból készülnek a laminálás során az alkatrész formáját, nagyobb méreteit készítik el, majd egy forgácsoló

megmunkálás következik a termék pontos méreteinek és felületi érdességének kialakításához [3]. A CFRP kompozit lap oldalainak megmunkálására azért is szükség van., mert a laminált lap az előállítás miatt a külső részein nem rendelkezik megfelelő fizikai tulajdonságokkal, ezért azokat le kell vágni. Ezt az eljárást a „szélezésnek” hívják.

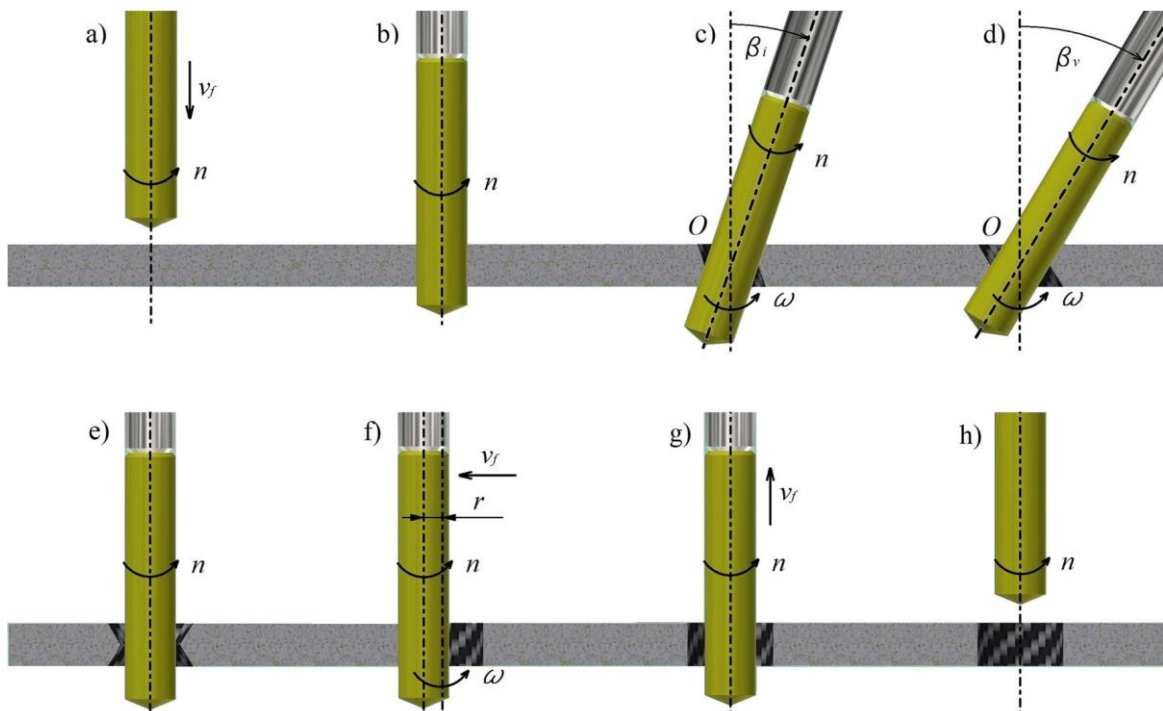
A CFRP kompozitok forgácsolása során azonban több olyan probléma is felléphet, amelyekkel a hagyományos fémforgácsolás közben ritkán, vagy nem találkozhatunk. Ilyen speciális hiba a delamináció, amely a laminált rétegek szétválását jelenti, de a vágtalan szálak kialakulása (sorja) is jellemző kompozitforgácsolási probléma.

A TDK dolgozatom 2. fejezetében bemutatom a CFRP kompozitok élmegmunkálására irányuló hazai és nemzetközi kutatásokat. Ezen fejezet végén tűzöm ki kutatásom fő célját. A 4. fejezetben a kísérleti körülményeket, a kísérleti eszközöket és a kísérlettervet mutatom be. Az 5. fejezet a kísérlet végrehajtásáról, a kísérlet közben fellépett problémáról és a kísérleti algoritmról szól. A 6. fejezetben a kiértékelés menetét, a mérési eredményeket és számolási metódusokat mutatom be. A 7. fejezetben összefoglalom a dolgozat készítése során gyűjtött tapasztalataimat, a jövőbeli terveimet pedig a 8. fejezetben mutatom be.

2. SZÉNSZÁLLAL ERŐSÍTETT POLIMER (CFRP) KOMPOZIT FORGÁCSOLHATÓSÁGA

2.1. Imbolygó marás

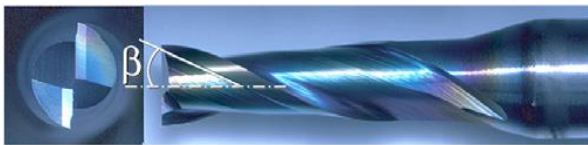
A fúrással történő furatmegmunkálás során fennáll a delamináció veszélye, ezért ennél a forgácsolási fajtánál is változtatni célszerű a hagyományos fúróstratégiákon. Egy ilyen változtatás az imbolygó marás (wobble milling), amelyet először Pereszlai Csongor és munkatársai [1] publikáltak. Ezen típusú megmunkálás során egy olyan speciális fúrószerszámot használunk, amely fúrássra és a palástfelületével maró megmunkálásra is használatos. Ez egy olyan szerszám, amely kisebb átmérőjű a készíteni kívánt furat átmérőjénél. Először hagyományos módon fúrunk egy előfuratot, majd a szerszámot bedöntve, körbeforgatjuk, így kialakítva két ferde felületet. Ezután egy helikális maráspályával kialakítható a végleges furatátmérő. A technológiát a 2.1-es ábra szemlélteti sematikusán. Az imbolygó marási stratégia előnye, hogy nem kell különleges szerszám a megmunkáláshoz, így egy hagyományos fúró-maró szerszámmal elkészíthető a furat, továbbá ezzel a szerszámmal elkészíthetőek a furat letörései is. A forgácsolásindukált delamináció és sorja nagysága is nagy mértékben kevesebbnek várható, mint a hagyományos technológiákkal megszokott [1], [13]. Ennek elsősorban a döntött szerszámmal okozott kompressziós hatás az oka.



2.1 ábra Imbolygó marás technológiája [1]

2.2. CFRP élmarására irányuló kutatások

A kompozitok élmarása során is kialakulhat delamináció, amelynek mértéke a folyamatparaméterek mellett a marószerszám horonyszögével szoros kapcsolatban van. Ezért több nemzetközi kutatás is foglalkozott már azzal, hogy mekkora a kedvezőbb horonyszög, amely kevésbé okoz delaminációt és sorját a megmunkálás során. Az egyik ilyen kutatás során egy 30°-os és egy 60°-os horonyszöggel rendelkező marószerszámot hasonlítottak össze. A nagyobb szöggel emelkedő maró bizonyult kedvezőbbnek a delamináció szempontjából. A 2.2-es és 2.3-as ábrákon a kutatásban használt marószerszámok láthatók. [2]

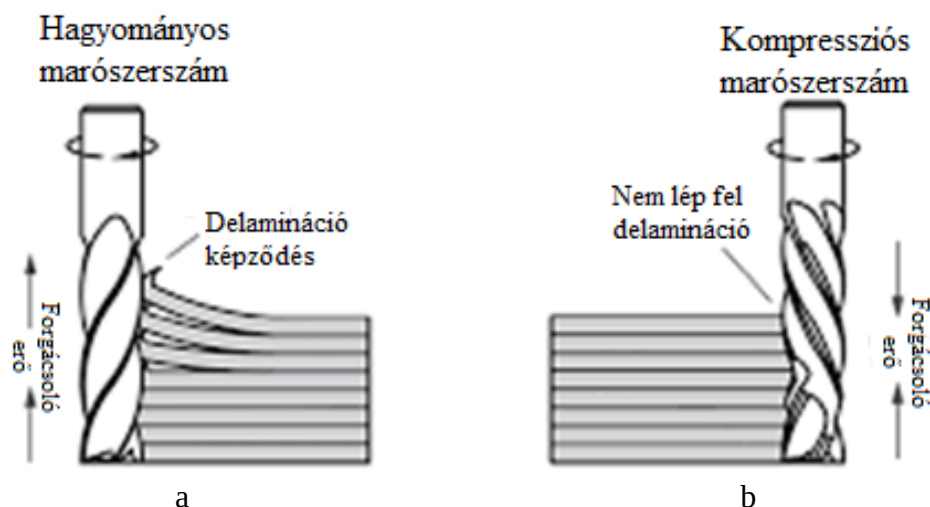


2.2 ábra 30°-os horonyszögű maró [2]



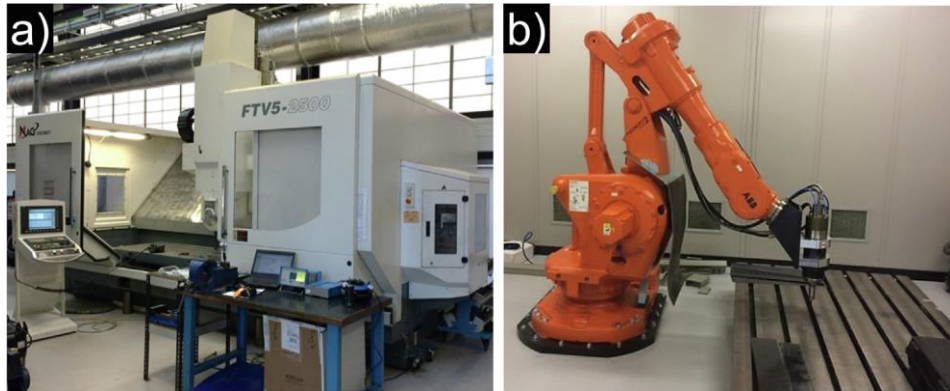
2.3 ábra 60°-os horonyszögű maró [2]

Hagyományos marószerszámmal való megmunkálás során jelentős volt a delamináció mértéke, hiszen a szerszám hornyának kialakításától függően szétválasztja a laminált rétegeket egymástól vagy a munkadarab alján, vagy a tetején. Annak érdekében, hogy a CFRP kompozitok oldalai delaminációmentesen, egyszerű mozgásciklusokkal forgácsolhatók legyenek, különleges szerszámok kifejlesztése volt szükséges (2.4 b ábra). Ez egy olyan marószerszám, amely két ellentétes horonyszöggel rendelkezik. A szerszám alsó részén pozitív, míg a felső részében negatív horonyszögű. Amíg a megmunkálás alsó részén a horonyszög miatt a szerszám felfelé nyomja az anyagot, addig a felső részén lefelé nyomja azt, így a kompressziós hatásokkal megakadályozza a delaminációt, és a vágatlan szálak mennyisége is kisebb lesz [18].



2.4 ábra CFRP kompozit élmarása hagyományos és kompressziós szerszámmal

Sam Ashworth és munkatársai azt vizsgálták, hogy milyen mértékben befolyásolja a szerszám gép merevsége a CFRP kompozit élmegmunkálását. A kísérletek során megállapították, hogy a szerszám geometriája szignifikáns szerepet játszik a munkadarab élén kialakuló sorja nagyságában. A kutatásuk eredményeképp megállapítható, hogy a kísérlet során vizsgált 6 tengelyes ABB robottal (2.5 b ábra) való megmunkálás rosszabb minőségű felületet eredményez, mint az 5 tengelyes megmunkálóközponttal (2.5 a ábra) elkészített. A kutatásban használt megmunkálógépek a 2.5 ábrán láthatók. [5]



2.5 ábra Sam Ashworth és munkatársai által használt megmunkálógépek:
a: 5 tengelyes megmunkálóközpont, b: 6 tengelyes ABB robot [5]

A CFRP kompozitok megmunkálása során figyelni kell a szerszámkopásra, hiszen a szénszálak vágásának nagy mértékű koptató hatása van. Az Egyesült Királyságbeli kutatók kísérletet állítottak fel annak érdekében, hogy a különböző szerszámalkakítások hogyan kopnak a szénszálerősítésű kompozitok megmunkálása során. A kutatásban egy sokfogú méhsejtmaró szerszámot (2.6 a ábra), és egy kompressziós hatást kifejtő szerszámot (2.6 b ábra) használtak. A kutatás során megállapítható, hogy a kompressziós hatást kifejtő marószerszám 49,9 %-kal csökkentette a delaminációt és kisebb kopást is mutatott a megmunkálás végén.[6]. A kísérletben felhasznált szerszámokat mutatja be a 2.6-os ábra.



2.6 ábra A brit kutatók által használt szerszámok:
a: sokfogú szerszám, b: kompressziós szerszám

A CFRP kompozitok megmunkálásánál figyelembe kell venni a szénszálak irányultságát, hiszen nagyon jelentős hatása van a sorjaképződésre és a delamináció mértékére [9]. Horonymarás esetén van egy előnyös szálvágási tartomány ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) és van egy szögtartomány ($90^\circ < \theta < 180^\circ$), amelynél a szálkinyúlás és a delamináció mértéke felerősödik. A kritikus szögtartományban a delamináció akár a munkadarab széléig is terjedhet.[7]

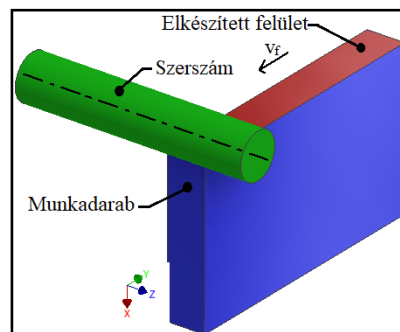
Az előzőleg ismertetett főbb kutatási területek a CFRP kompozit anyag marási technológiáival kapcsolatosak. Az eddigi hazai és külföldi kutatások azonban nem foglalkoztak azzal, hogy hagyományos marószerszámmal miként lehet ezen kompozit anyag éleit úgy forgácsolni, hogy delamináció ne keletkezzen, valamint a sorja minél kisebb legyen.

Ezért kutatásom fő célja egy olyan élmarási technológia kidolgozása volt, amellyel hagyományos marószerszámmal a CFRP kompozit kellő minőségben forgácsolható. A kutatásom alapjául szolgáló, többtengelyes furatmegmunkálási ciklust (imbolgyó marás) vettem alapul és oldottam meg az élmaráshoz használható „kiterített” implementációját. További célom volt az egyes marási technológiák hatásvizsgálata a forgácsolásindukált sorja nagyságára.

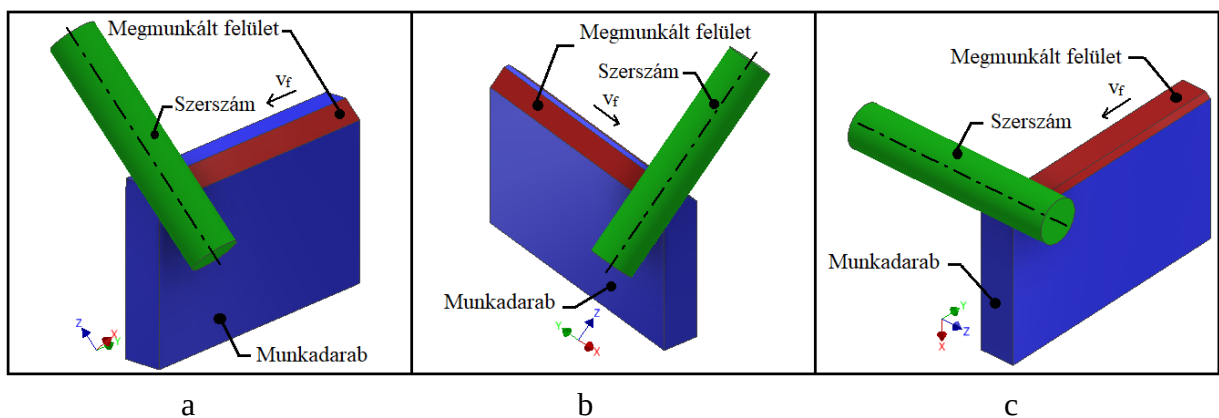
3. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK, ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

3.1. Kísérlettervezés

A kísérlet során a két megmunkálási technológia közti különbséget vizsgáltam. Az első technológia egy hagyományos palástmaró pályával készítette el a kívánt élet (lásd 3.1 ábra), a második technológia 3 különböző mozgáspályával alakította ki a megmunkált élszakaszt (lásd 3.2 ábra). A többtengelyes palástmaró technológia műveleteleme 3 mozgásszakaszból áll. Az első szakaszban egy 45°-os ferde felületet készít a szerszám (lásd 3.2.a ábra), a második szakaszban a megmunkálandó él másik oldalán is elkészít egy 45°-os ferde felületet (lásd 3.2.b ábra), végül a harmadik szakaszban egy hagyományos élmaró ciklussal véglegesíti az él geometriáját (lásd 3.2.c ábra).



3.1 ábra Élmarás palástfelülettel



3.2 ábra Élmarás többtengelyes megmunkálással: (a) A munkadarab élének első megmunkálási fázisa meghatározott bedöntési szögben, (b) A munkadarab élének első megmunkálási fázisa meghatározott bedöntési szögben, (c) Az él végleges kialakítása

A kísérlettervezés összeállításához a Central Composite kísérlettervezési módszert alkalmaztam. A kísérlet megtervezéséhez a Minitab szoftvert használtam, amely szükséges és elégséges számban randomizálja a kísérletek vérehajtási sorrendjét. Erre azért volt szükség, hogy a kísérlet során figyelmen kívül hagyott tényezők befolyása állandó maradjon a kísérlet során. A kísérleti faktoroknak az előtoló sebesség (v_f), a fogásszélesség (a_e) és a megmunkálási technológia lettek meghatározva. Az előtoló sebesség és a fogásszélesség faktort 5-5 szinten vizsgáltam, míg a megmunkálási technológiát 2 szinten. A faktorokat és a vizsgált szinteket a 3.1-es táblázat foglalja össze.

3.1 táblázat: Faktorok és faktorszintek

Faktorok	Jelölés	Faktorszintek				
		1	2	3	4	5
Előtoló sebesség	$v_f \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right)$	100	143,934	250	356,066	400
Fogásszélesség	$a_e \text{ (mm)}$	0,3	0,343	0,45	0,556	0,6
Megmunkálási technológia	-	palástmarás	többtengelyes palástmarás			

A kísérletek során rögzített paraméterek:

- fordulatszám: $n = 6000 \left(\frac{1}{\text{min}} \right)$
- rögzítőcsavarok meghúzási nyomatéka: 3 (Nm)
- CFRP kompozit száliránya: előtoló sebességre merőleges
- letörés nagysága: $\varphi = 45 \text{ (}^\circ\text{)}$
- a letörés magassága megegyezik a beállított fogásszélesség értékével
- hosszkorrekció: $H = 47,046 \text{ (mm)}$

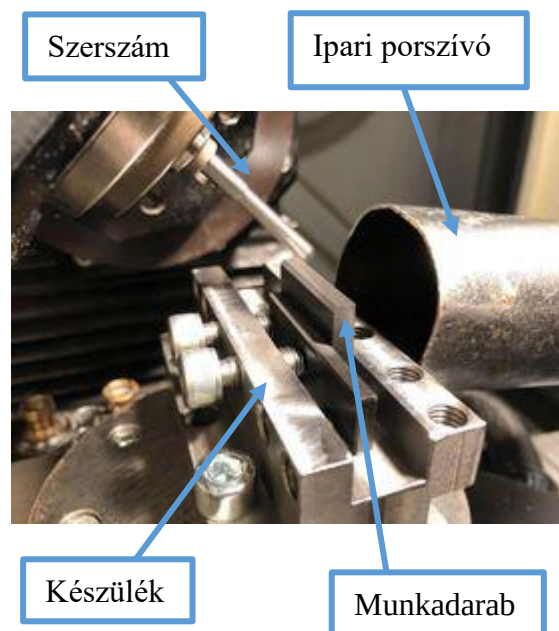
3.2. Kísérleti környezet

3.2.1. FORGÁCSOLÓ KÖRNYEZET

A forgácsolási kísérleteket a Gyártástudomány és -technológia Tanszék VHTC-130 LINEAR 5 tengelyes megmunkálóközpontján végeztem el (lásd 3.3 ábra). A kísérletek során az „M1”-es készüléket alkalmaztam. Ez a készülék egy olyan speciális munkadarab befogó, amelybe a 3.4 ábrán látható módon csavarokkal és egy közdarabbal lehet beszorítani a munkadarabot annak érdekében, hogy megmunkálás közben ne mozduljon ki. A készüléknek köszönhetően a befogáshoz szükséges szorító csavarokat adott nyomatékra lehet húzni, így ezt a paramétert is rögzítettem a kísérletek során.



3.3 ábra Szerszámgép



3.4 ábra Megmunkáló környezet

A készülék felhelyezésénél figyeltem arra, hogy a készülék hosszabbik oldala (100 mm) párhuzamos legyen a szerszámgép Y tengelyével. Ezt egy analóg óra segítségével határoztam meg. A párhuzamosság eltérést a 100 mm-en $\pm 10 \mu\text{m}$ -re sikerült csökkenteni. Ez az eltérés meglehetősen kicsi, így a kiértékelésnél nem vettem figyelembe.

A forgácsolást egy THOMAS 23N1106 számú, $D = 6 \text{ mm}$ átmérőjű tömör keményfém szerszámmal végeztem el. A szerszám horonyszöge $\beta = 0^\circ$, amely azért lényeges, mert így a megmunkálás közben a szerszámból nem adódik kompressziós hatás a munkadarabra. A szerszám a 3.5-ös ábrán látható.



3.5 ábra Forgácsoló szerszám

Mivel a CFRP kompozitban található szénzálak erős koptató hatásúak, a kísérlet közben elszívást kellett alkalmazni annak érdekében, hogy a forgács ne kerüljön a szerszám-gép vezetőkeire, csapágyazásaira. A kísérlet során használt tanszéki Nilfisk GB733 számú ipari porszívó a 3.6-os ábrán látható.



3.6 ábra Ipari porszívó [4]

3.2.2. SZTEREOMIKROSKÓPOS VIZSGÁLATI KÖRNYEZET

A forgácsolt munkadarabokról az Anyagtudomány és Technológia Tanszék OLYMPUS SZX16 sztereomikroszkóppal vizsgáltam meg, és a mikroszkóphoz tartozó Stream szoftver segítségével készítettem a fényképeket. A munkadarabokat 20-szoros nagyításban vizsgáltam meg. A sztereomikroszkóp a 3.7-es ábrán látható.

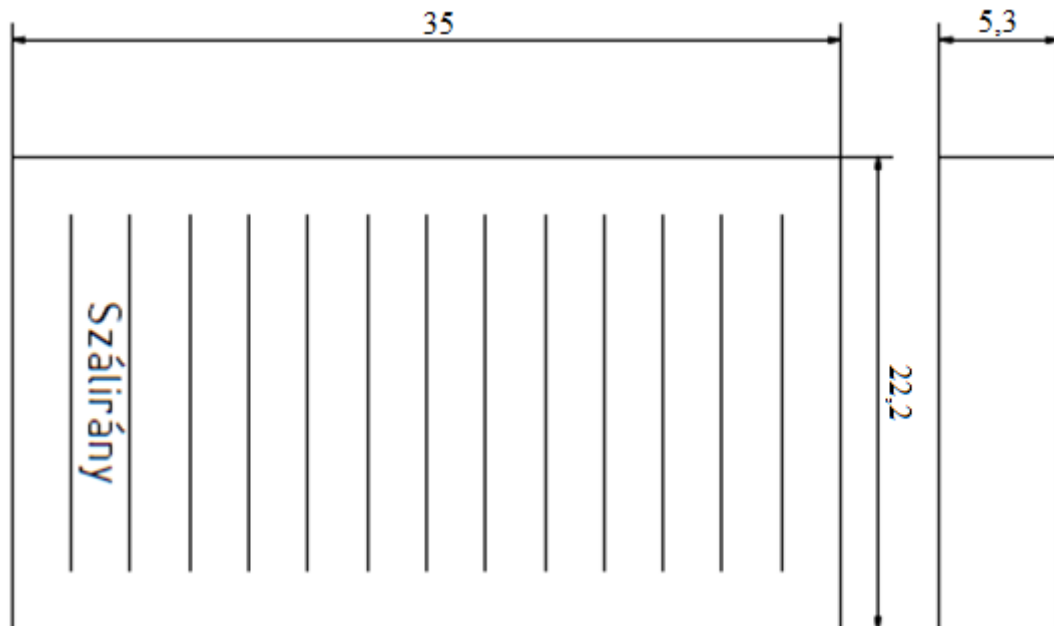
Minden élről három felvétel készült annak érdekében, hogy átlagos élhosszt és szórást lehessen számolni.



3.7 ábra Sztereomikroszkóp

3.3. Kísérlet előgyártmánya

A kísérlettervezés során fontos volt meghatározni az előgyártmány pontos méretét, hiszen a szerszámgép kis munkatere miatt ütközések léphettek volna fel a készülék és a szerszámgép főorsót tartó oszlopa közt. Ezért a kísérletek során 35 mm hosszú, 22,2 mm magas és 5,3 mm széles előgyártmányból indultam ki. Az előgyártmány műhelyrajza a mellékletekben található. Az előgyártmány műszaki rajza a 3.8-as ábrán látható. Az előgyártmányt Poór Dániel István készítette el az alkatrészrajzok alapján.



3.8 ábra Előgyártmány

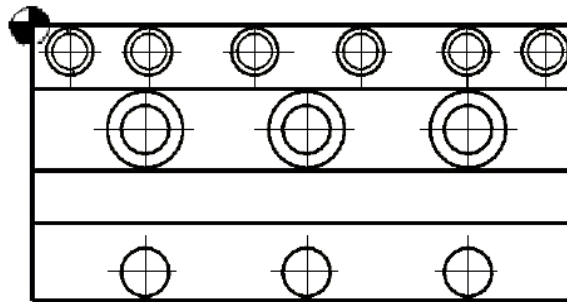
3.4. Kísérlet NC kódja

A kísérlethez szükséges NC kód paraméteres módon került megírásra annak érdekében, hogy egy a kísérlethez szükséges bemenő adat gyorsan és hatékonyan változtatható legyen. Az NC kód a 9.2 sz mellékletben található.

Azon paraméterek, amelyet minden kísérlet alkalmával meg kell adni:

- Kísérlet típusa (megmunkálási technológia)
- Munkadarab szélessége
- Munkadarab magassága
- Munkadarab hossza
- Munkadarab nullponttól való Y távolsága

A megmunkáláshoz szükséges nullpontot az M1-es készülék felső síkjának sarkába kell felvenni a 3.9-es ábrán látható módon. Az NC program futása során a nullpontot ebből a pozícióból helyezi és forgatja a szükséges pozícióba.



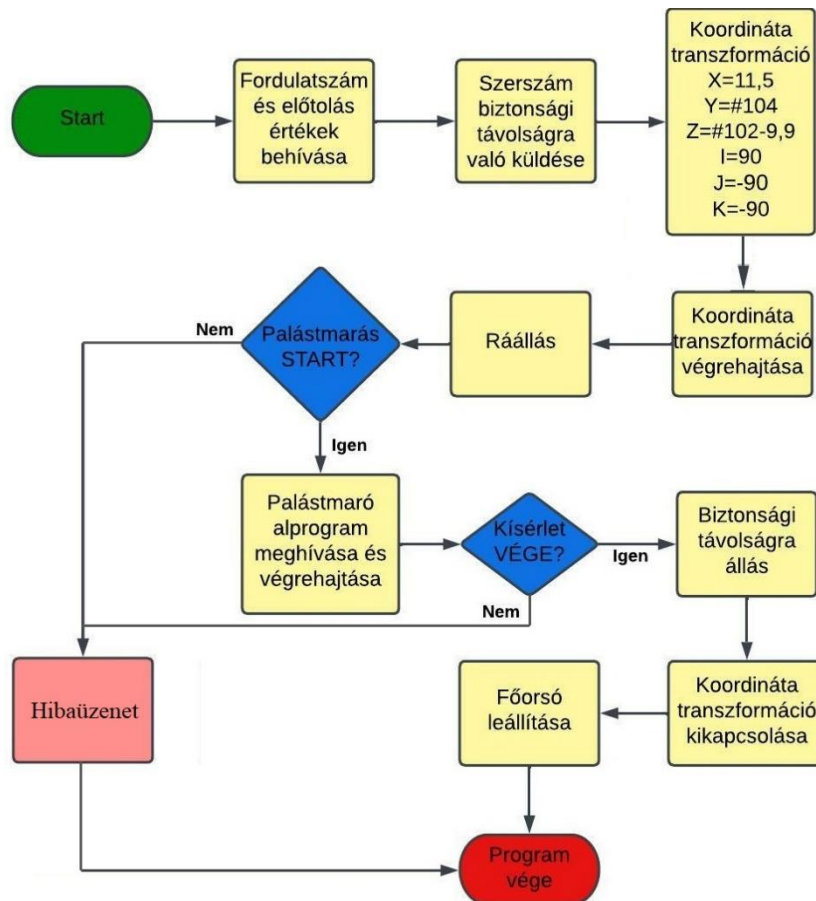
3.9 ábra Nullpont helyzete a készüléken

A szerszámgép relatíve kis munkatere miatt fokozottan ügyelni kellett az esetleges ütközésekre. Ezért az NC program több bemenő adatot is megvizsgál annak érdekében, hogy az esetleges ütközések elkerülhetők legyenek. Abban az esetben, ha a program ütközést feltételez, akkor arra egy figyelmeztető üzenetet küld a vezérlőpanelen.

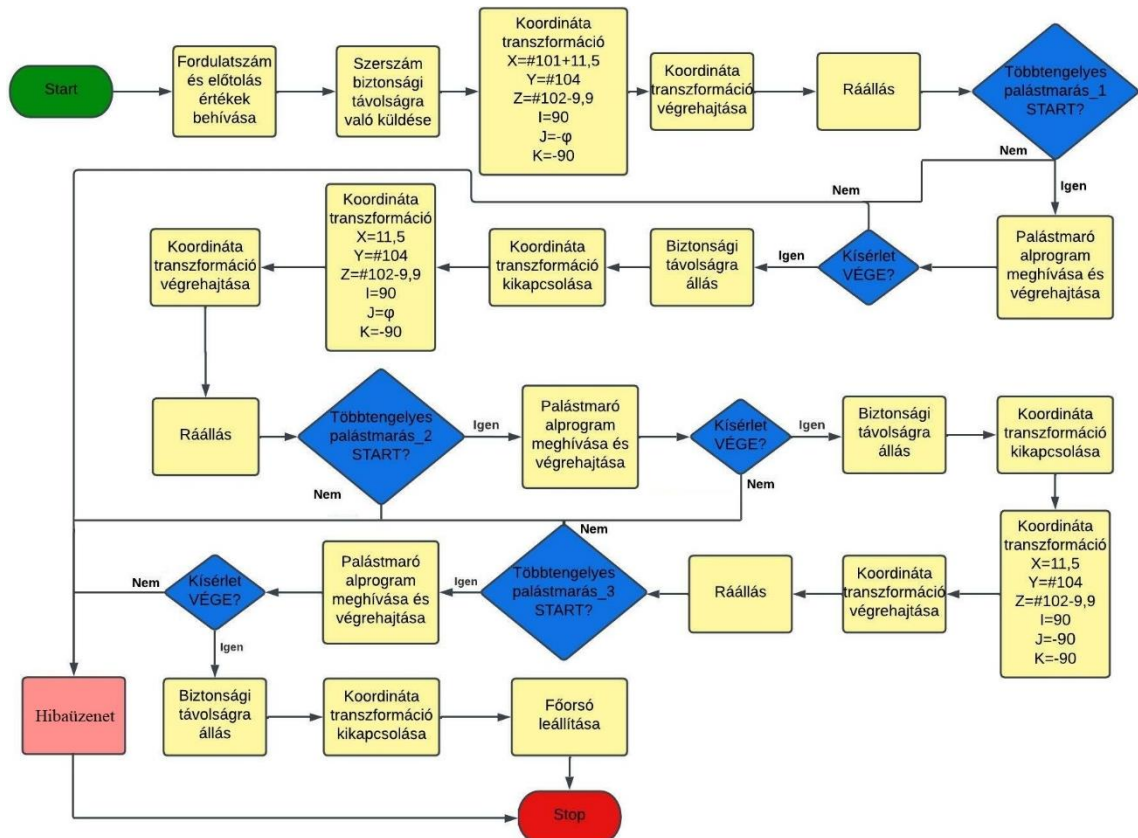
Az NC kód fő- és alprogramokból épül fel. A főprogram tartalmazza a nullponteltolásokat, a forgácsolási paramétereket, az ütközésellenőrzéseket, és a megmunkáláshoz szükséges paraméteresen megadott adatokat. Az alprogramok csak a megmunkáláshoz szükséges mozgáspályákat tartalmazzák.

A palástmarás technológia algoritmus a 3.10-es ábrán látható. Ezen technológia algoritmusában az első lépés a fordulatszám és előtolás értékek behívása volt. Ez után következett a szerszám biztonsági síkba való küldése, majd a koordináta transzformáció és annak végrehajtása. A következő lépésben a szerszám megközelítette a munkadarabot. Majd az algoritmus egy start jelre várt, erre azért volt szükség, hogy megbizonyosodjunk róla, hogy a megmunkálás előtt minden kísérleti eszköz működik-e (pl. ipari porszívó), illetve minden paraméter megfelelően lett-e beállítva. Ezek után a szerszám elkészíti a felületet. A megmunkálás után az algoritmus szintén egy start jelre vár, hiszen ettől a lépéstől kezdve az ipari porszívó működtetésére már nincs szükség, így az kikapcsolható. A start jel megadása után egy biztonsági távolságra áll a szerszám, majd az algoritmus kikapcsolja a koordináta transzformációt. Végül leállítja a főorsó forgását.

A többtengelyes palástmarás algoritmus (lásd 3.11 ábra) már jóval hosszabb, hiszen itt egymás után három palástmaró algoritmus van beágyazva egyetlen algoritmusba. A különbség abban rejlik, hogy a többtengelyes palástmarás algoritmusánál az egyes megmunkálásokhoz más-más koordináta transzformációk szükségesek.



3.10 ábra Palástmaró technológia algoritmus



3.11 ábra Többtengelyes palástmaró technológia algoritmus

4. KÍSÉRLET ELVÉGZÉSE

A kísérletek során először a munkadarab névleges méreteit kellett megmérni, és az CNC programba a megfelelő regiszterbe beírni. Ezek után az egyes kísérletekhez tartozó forgácsolási paramétereket kellett beírni, végül a forgácsolási technológiát kellett megadni. A programban 2-essel lehetett megadni a palástmaró technológiát, míg a többtengelyes palástmaráshoz 5-öt kellett beírni.

A kísérletek során 13 darab előgyártmány állt rendelkezésre. A 26 kísérletet egyszerre nem lehetett végrehajtani, hiszen a második befogásban sérült volna a később mikroszkóppal vizsgált él. Így a 13. kísérlet után el kellett végezni a sztereomikroszkópos mérést. A mikroszkópia után folytatódhatott a forgácsoló kísérlet a már lefénképezett munkadarabok megfordításával.

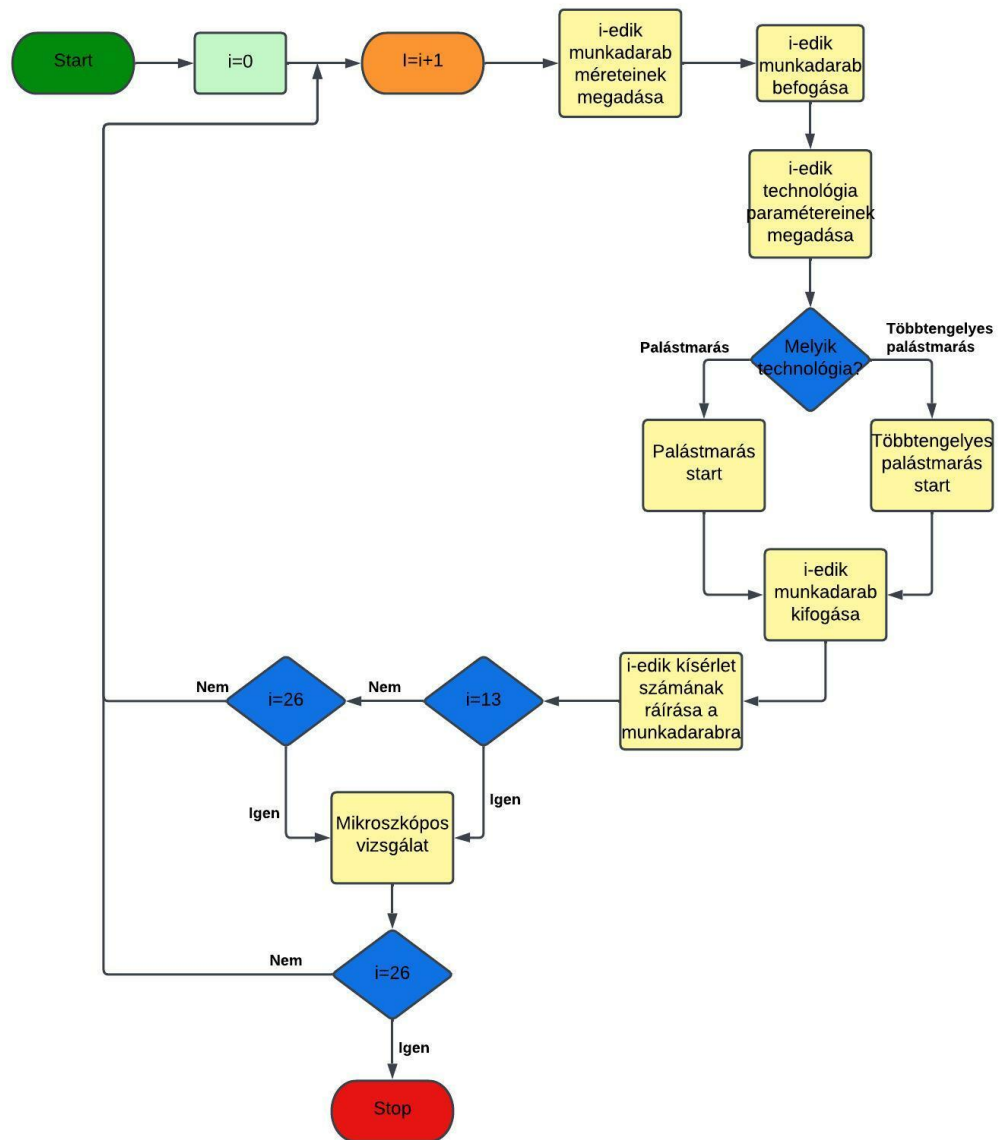
A kísérlet algoritmus az 4.2-es ábrán látható. Először a munkadarab befoglaló méreteit kellett megadni az algoritmusnak, majd a munkadarab befogása és a forgácsolási paraméterek beállítása következett. Ezek után meg kellett adni, hogy a palástmaró vagy a többtengelyes palástmaró technológiával munkáljuk meg a felületet. A következő lépésben kifogtuk a munkadarabot és ráírtuk a kísérlet sorszámát, hogy később könnyen azonosítható legyen a munkadarab. A 13. és 26. kísérletek után mikroszkópos vizsgálatokra került sor. A kísérleti jegyzőkönyv a 9.1 sz. mellékletben található.

A második kísérlet során a többtengelyes palástmaró technológia során nem a megfelelő fogásszélesség lett beállítva, ezért azt egy új előgyártmányon a 27. kísérletben megisméltetem. A kísérletek végrehajtási sorrendje a 4.1-es táblázatban található.

A munkadarabokról készült képek fájlneveit úgy kellett elnevezni, hogy az a későbbiekben jól azonosítható legyen. Minden kép fájlneve 3 karaktert tartalmaz: az első karakter a kísérlet sorszáma, a második a sztereomikroszkóp nagyítása, a harmadik karakter pedig az adott munkadarab éléről készült kép sorszáma. A fájlnevet az 4.1-es ábrán látható.



4.1 ábra Munkadarabról készült képek fájlneveinek magyarázata



4.2 ábra Kísérlet folyamatábrája

4.1 táblázat Kísérletek végrehajtási sorrendje

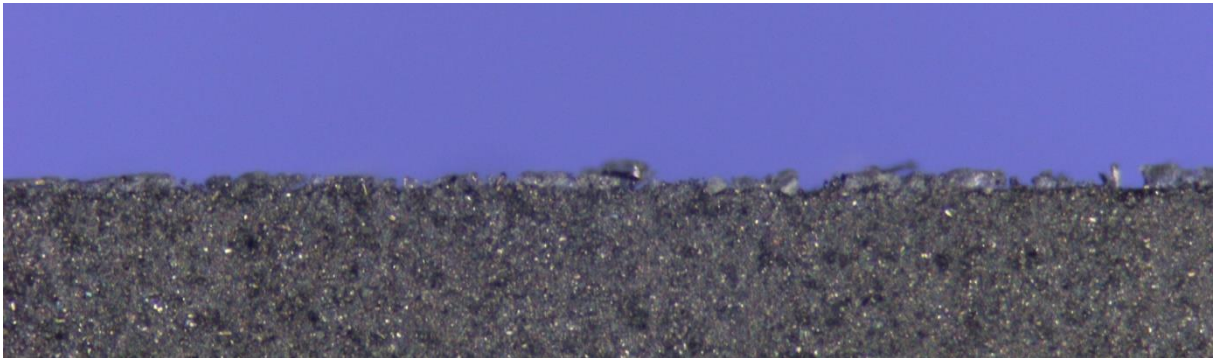
Kísérlet	Kísérlet sorszáma	Előtolás	Fogásszélesség	Technológia
(-)	(-)	$v_f \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right)$	$a_e \text{ (mm)}$	(-)
1	1	143,934	0,556	Palástmarás
	2	143,934	0,556	Többtengelyes palástmarás
2	3	250,000	0,450	Palástmarás
	4	250,000	0,450	Többtengelyes palástmarás
3	5	250,000	0,450	Palástmarás
	6	250,000	0,450	Többtengelyes palástmarás
4	7	143,934	0,343	Palástmarás
	8	143,934	0,343	Többtengelyes palástmarás
5	9	100,000	0,450	Palástmarás
	10	100,000	0,450	Többtengelyes palástmarás
6	11	250,000	0,450	Palástmarás
	12	250,000	0,450	Többtengelyes palástmarás
7	13	250,000	0,450	Palástmarás
	14	250,000	0,450	Többtengelyes palástmarás
8	15	250,000	0,600	Palástmarás
	16	250,000	0,600	Többtengelyes palástmarás
9	17	356,066	0,343	Palástmarás
	18	356,066	0,343	Többtengelyes palástmarás
10	19	250,000	0,300	Palástmarás
	20	250,000	0,300	Többtengelyes palástmarás
11	21	250,000	0,450	Palástmarás
	22	250,000	0,450	Többtengelyes palástmarás
12	23	356,066	0,556	Palástmarás
	24	356,066	0,556	Többtengelyes palástmarás
13	25	400,000	0,450	Palástmarás
	26	400,000	0,450	Többtengelyes palástmarás

5. EREDMÉNYEK

5.1. *Képfeldolgozó algoritmus*

A képfeldolgozás során először a Wolfram Mathematica 13.1 szoftverrel meghatároztam a képeken található munkadarabok éleit (lásd 5.1 ábra), oly módon, hogy az élek fehér pixelekké legyenek ábrázolva, míg a nem élhez tartozó képpontok feketék legyenek. Az így elkészült kép a 5.2-es ábrán látható, amely az 1_10x_1-es kísérlethez tartozik. Ezután egy másik algoritmus megszámolta a fehér képpontok számát. Az élkereső és a fehér képpontszámláló algoritmus kódja az 9.3. sz. mellékletben található.

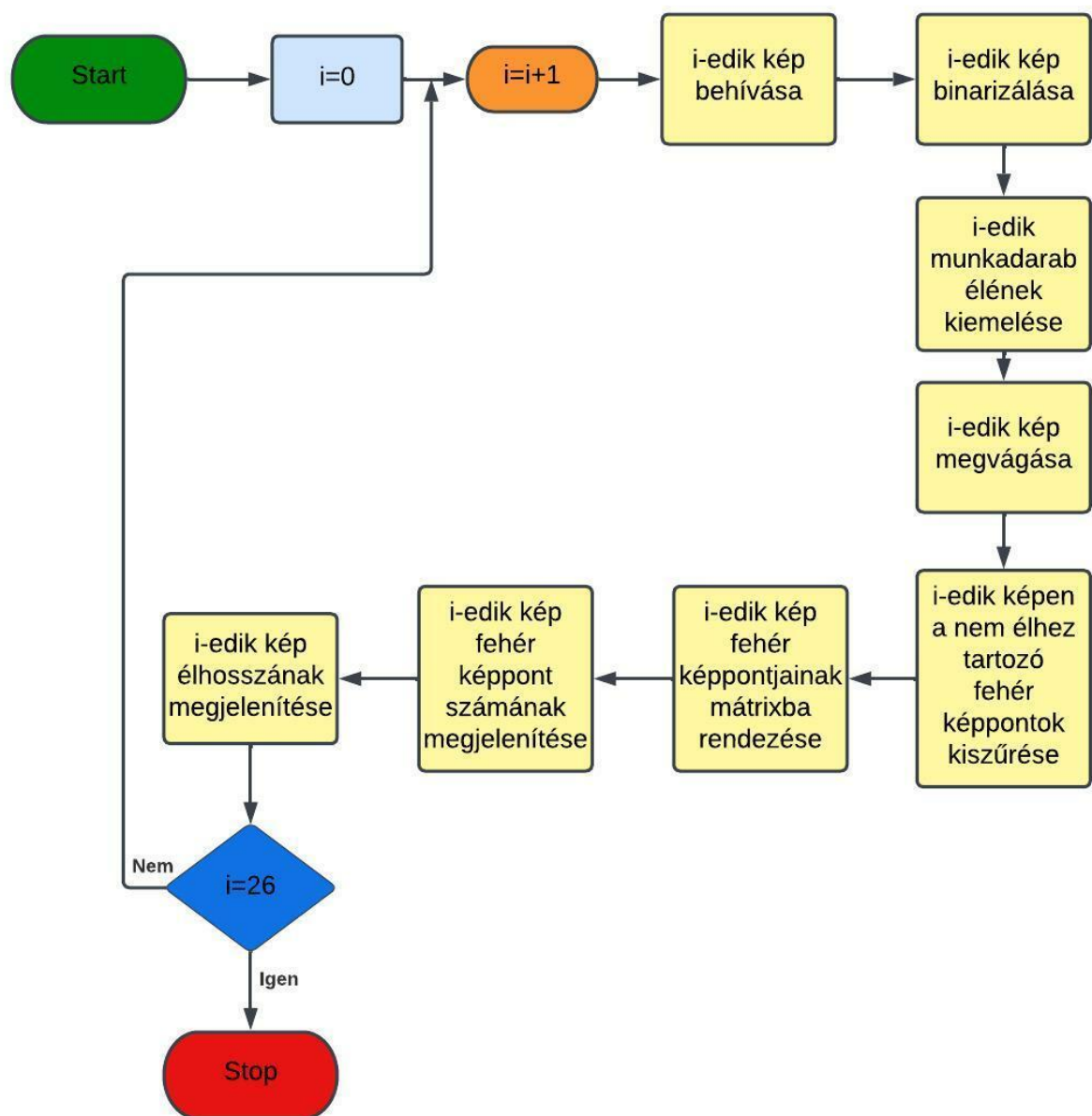
A képfeldolgozó algoritmus blokkdiagramja a 5.3-as ábrán látható. Az algoritmus először behívja a képet, majd binarizálja azt. Ezek után kiemeli a munkadarab élét és megvágja a képet, hogy a kiértékelés szempontjából felesleges képpontokkal ne kelljen számolni a későbbiekben. Az algoritmus ezt követően kiszűri a képen található fehér képpontokat, majd egy mátrixba rendezi azokat. Végül megadja az egyes képek fehér képpontjainak számát és az egyes képek hosszúságát.



5.1 ábra Lefényképezett él



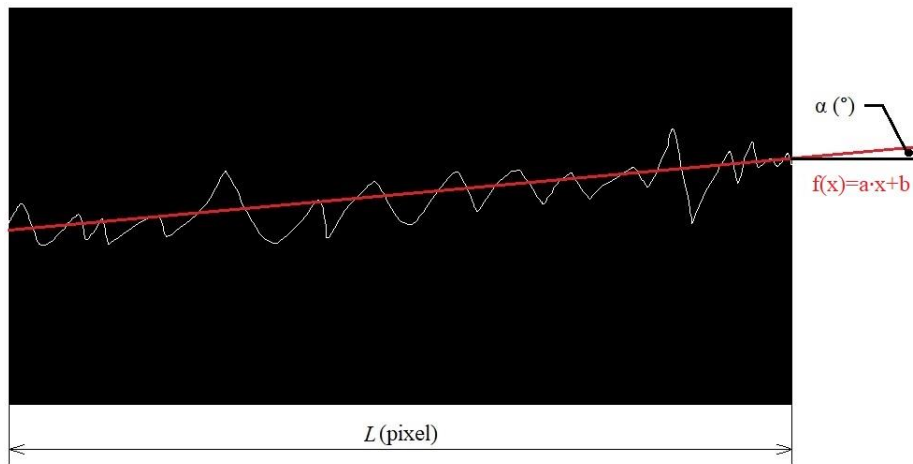
5.2 ábra Képfeldolgozó algoritmus által generált kép



5.3 ábra A képfeldolgozó algoritmus blokkdiagramja

5.2. Képszélesség kompenzációja

A fehér képpontok számát leosztva a képek szélességével megkapjuk az egységnyi élhosszt. Az elkészített képek azonban nem vízszintesek, így, ha a képszélesség pixelszámával osztunk, akkor nem összevethető eredményt kapunk, hiszen minden kép meredeksége különböző. Ezért a generált képen található fehér képpontokat egy mátrixba rendezve kigyűjtöttem, és a MS Excel segítségével a legkisebb négyzetek módszerével közelítő egyenest illesztettem a pontokra. A közelítő egyenes meredeksége megegyezik a kép ferdeségével, így ezzel az adattal kiszámoltam a tényleges élhosszt. A korrigált élhosszal elosztva a fehér pixelek számát már összehasonlítható eredményt kapunk. A képpontok meredekségét a 5.4-es ábra szemlélteti. A képek eredeti képhosszát, meredekségét, valós képhosszát a 5.1 táblázat tartalmazza.



5.4 ábra Képpontok meredeksége

A valódi kompenzált képszélesség kiszámítása:

$$L_{valós} \text{ (pixel)} = \frac{L}{\cos(\arctan(a))} \quad (1)$$

, ahol $L_{valós}$ (pixel) a valós képhossz, L (pixel) az eredeti képhossz, a (-) az illesztett egyenes meredeksége.

5.1 táblázat Képek valós szélessége

Kísérlet sor- száma (-)	Képek eredeti szélessége L (pixel)			Képmeredekség a (-)			Valós képszélesség $L_{valós}$ (pixel)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1138,0000	1123,0000	1138,0000	0,0011	0,0131	0,0213	1138,0007	1123,0964	1138,2581
2	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0056	0,0095	0,0125	1147,0180	1147,0518	1147,0896
3	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0153	0,0036	0,0075	1147,1342	1147,0074	1147,0323
4	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0092	0,0068	0,0054	1147,0485	1147,0265	1147,0167
5	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0019	0,0104	0,0100	1147,0021	1147,0620	1147,0573
6	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0093	0,0134	0,0019	1147,0496	1147,1030	1147,0021
7	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0119	0,0101	0,0007	1147,0812	1147,0585	1147,0003
8	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0119	0,0101	0,0007	1147,0812	1147,0585	1147,0003
9	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0206	0,0016	-0,0102	1147,2433	1147,0015	1147,0597
10	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0206	0,0016	-0,0102	1147,2433	1147,0015	1147,0597
11	1147,0000	1147,0000	1132,0000	-0,0062	-0,0150	-0,0031	1147,0220	1147,1290	1132,0054
12	1132,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0005	-0,0092	-0,0068	1132,0001	1147,0485	1147,0265
13	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0125	-0,0116	0,0026	1147,0896	1147,0772	1147,0039
14	1132,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0002	-0,0081	-0,0136	1132,0000	1147,0376	1147,1061
15	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0022	-0,0243	-0,0196	1147,0028	1147,3386	1147,2203
16	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0045	-0,0021	-0,0221	1147,0116	1147,0025	1147,2801
17	1147,0000	1147,0000	1147,0000	0,0239	0,0052	-0,0062	1147,3275	1147,0155	1147,0220
18	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0047	-0,0116	-0,0114	1147,0127	1147,0772	1147,0745
19	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0049	-0,0091	0,0035	1147,0138	1147,0475	1147,0070
20	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0034	-0,0183	-0,0191	1147,0066	1147,1920	1147,2092
21	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0009	-0,0014	-0,0213	1147,0005	1147,0011	1147,2602
22	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0127	-0,0045	-0,0101	1147,0925	1147,0116	1147,0585
23	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0097	0,0102	0,0088	1147,0540	1147,0597	1147,0444
24	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0063	0,0169	-0,0084	1147,0228	1147,1638	1147,0405
25	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0115	-0,0072	-0,0104	1147,0758	1147,0297	1147,0620
26	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0207	-0,0146	-0,0093	1147,2457	1147,1222	1147,0496
27	1147,0000	1147,0000	1147,0000	-0,0075	-0,0019	-0,0124	1147,0323	1147,0021	1147,0882

5.3. Fajlagos élhossz és élhossz számítása

Annak érdekében, hogy az eredmények megfelelően összevethetőek legyenek a képfeldolgozó algoritmus által kiszámolt élhosszakat fajlagosítani kellett a kép valós szélességével.

A fajlagos élhossz számítása:

$$L_{fajl.}(-) = \frac{N_{fehér}(\text{pixel})}{L_{valós}(\text{pixel})} \quad (2)$$

, ahol a $L_{fajl.}(-)$ a képpontok fajlagos élhossza, a $N_{fehér}(\text{pixel})$ a képfeldolgozó algoritmus által meghatározott fehér képpontok száma.

Az így kapott eredményeket átlagolva egy fajlagos átlagos élhosszt lehet meghatározni. Az így kapott eredmények már összevethetőek lesznek. A számolt eredményeket a 5.2 táblázat foglalja össze.

A fajlagos átlagos élhossz kiszámítása:

$$L_{fajl.átl.}(-) = \frac{L_{fajl.-1}(-) + L_{fajl.-2}(-) + L_{fajl.-3}(-)}{3} \quad (3)$$

, ahol $L_{fajl.átl.}(-)$ a fajlagos élhosszak átlaga.

5.2 táblázat A számolt adatok

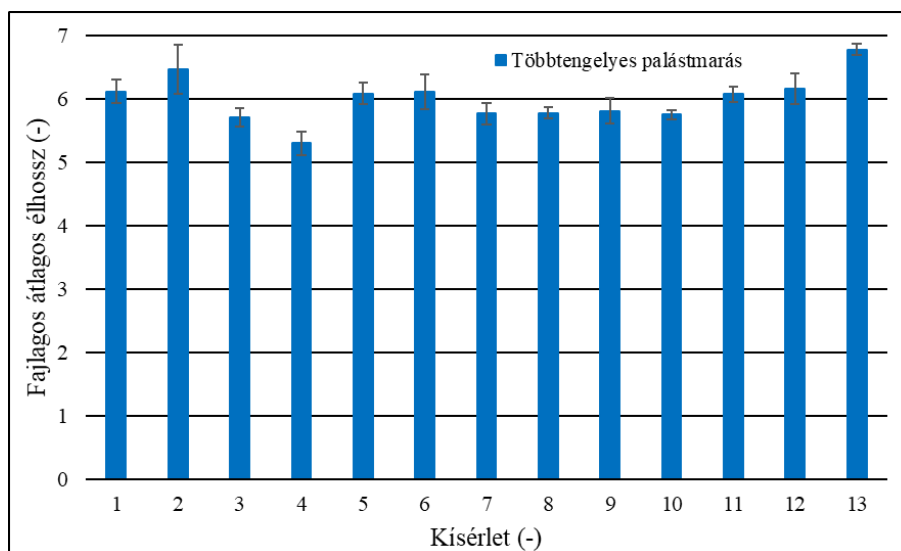
Kísérlet sorszáma (-)	Fehér képpontok száma $N_{\text{fehér}}$ (pixel)			Valós képszélesség $L_{\text{valós}}$ (pixel)			Fajlagos élhossz $L_{\text{fajl.}} (-)$			Fajlagos átlagos élhossz $L_{\text{fajl. átl.}} (-)$
1	10921,00	7839,00	9629,00	1138,00	1123,10	1138,26	9,60	6,98	8,46	8,35
2	5992,00	6912,00	6945,00	1147,02	1147,05	1147,09	5,22	6,03	6,05	5,77
3	10793,00	10588,00	10597,00	1147,13	1147,01	1147,03	9,41	9,23	9,24	9,29
4	6802,00	7031,00	8423,00	1147,05	1147,03	1147,02	5,93	6,13	7,34	6,47
5	10210,00	9263,00	10972,00	1147,00	1147,06	1147,06	8,90	8,08	9,57	8,85
6	6744,00	6733,00	6151,00	1147,05	1147,10	1147,00	5,88	5,87	5,36	5,70
7	10700,00	12197,00	13618,00	1147,08	1147,06	1147,00	9,33	10,63	11,87	10,61
8	6514,00	6083,00	5639,00	1147,08	1147,06	1147,00	5,68	5,30	4,92	5,30
9	7070,00	7431,00	7920,00	1147,24	1147,00	1147,06	6,16	6,48	6,90	6,52
10	7257,00	6539,00	7135,00	1147,24	1147,00	1147,06	6,33	5,70	6,22	6,08
11	11018,00	11779,00	11069,00	1147,02	1147,13	1132,01	9,61	10,27	9,78	9,88
12	7386,00	6301,00	7235,00	1132,00	1147,05	1147,03	6,52	5,49	6,31	6,11
13	9916,00	10054,00	8881,00	1147,09	1147,08	1147,00	8,64	8,76	7,74	8,38
14	6148,00	6604,00	7012,00	1132,00	1147,04	1147,11	5,43	5,76	6,11	5,77
15	12954,00	10490,00	10570,00	1147,00	1147,34	1147,22	11,29	9,14	9,21	9,88
16	6845,00	6470,00	6574,00	1147,01	1147,00	1147,28	5,97	5,64	5,73	5,78
17	7223,00	7170,00	6751,00	1147,33	1147,02	1147,02	6,30	6,25	5,89	6,14
18	6903,00	6950,00	6146,00	1147,01	1147,08	1147,07	6,02	6,06	5,36	5,81
19	7122,00	6740,00	6865,00	1147,01	1147,05	1147,01	6,21	5,88	5,99	6,02
20	6465,00	6557,00	6784,00	1147,01	1147,19	1147,21	5,64	5,72	5,91	5,76
21	7827,00	7424,00	6528,00	1147,00	1147,00	1147,26	6,82	6,47	5,69	6,33
22	7287,00	6821,00	6788,00	1147,09	1147,01	1147,06	6,35	5,95	5,92	6,07
23	8513,00	7689,00	8093,00	1147,05	1147,06	1147,04	7,42	6,70	7,06	7,06
24	6722,00	7702,00	6762,00	1147,02	1147,16	1147,04	5,86	6,71	5,90	6,16
25	10990,00	9142,00	7782,00	1147,08	1147,03	1147,06	9,58	7,97	6,78	8,11
26	7555,00	7952,00	7815,00	1147,25	1147,12	1147,05	6,59	6,93	6,81	6,78
27	7042,00	7439,00	6570,00	1147,03	1147,00	1147,09	6,14	6,49	5,73	6,12

5.4. Fogásszélesség és előtoló sebesség hatása

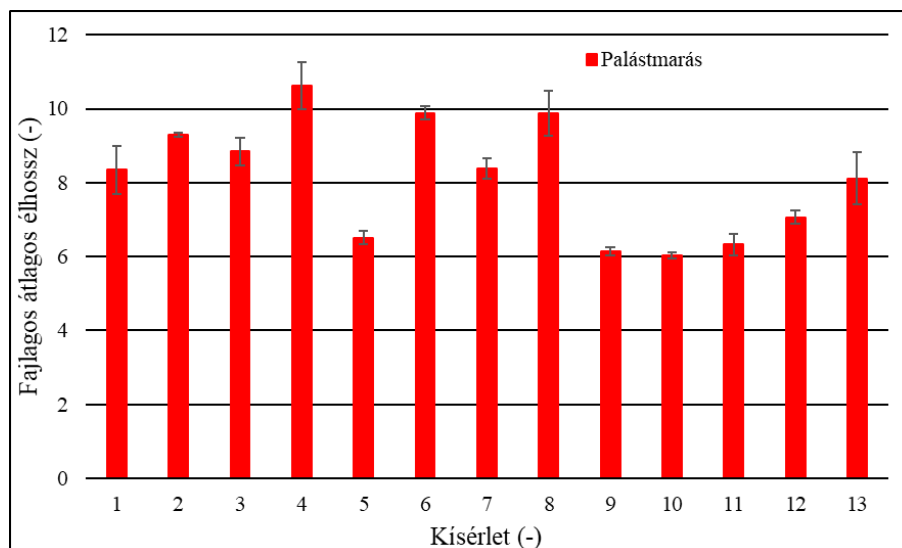
Egyféle technológiát vizsgálva a többtengelyes palástmarásnál az előtoló sebességnek és a fogásszélességnek kisebb hatása van az él minőségére, mint a hagyományos palástmarási technológiával végzett kísérleteknél. A többtengelyes technológiával végzett kísérleteknél 1,4 a fajlagos élhossz terjedelme, míg a palástmaró technológiánál 4,6-ra adódott az adatok terjedelme.

A legjobb minőségű él a többtengelyes palástmaró technológiánál 5,3 fajlagos élhosszra, míg a palástmaró technológiánál 6 fajlagos élhosszra adódott. A legrosszabb minőségű pedig a többtengelyes palástmarásnál 6,7 (-), palástmarásnál 10,6 (-) fajlagos élhosszt eredményezett.

A két technológia között megfigyelhető, hogy nem csak az adatok terjedelme közt van különbség, hanem a legjobb és legrosszabb minőségű élek is más-más kísérlethez tartoznak. Többtengelyes palástmarásnál a legjobb minőséget a 4-es kísérlet adta, míg a legrosszabb minőségűt a 13-as kísérlet. Palástmarásnál a legjobb minőségű élet a 10-es kísérlet, míg a legrosszabbat a 4-es kísérlet adta. Az egyes technológiák fajlagos átlagos élhosszát mutatják a 5.5-ös és 5.6-os ábrák.



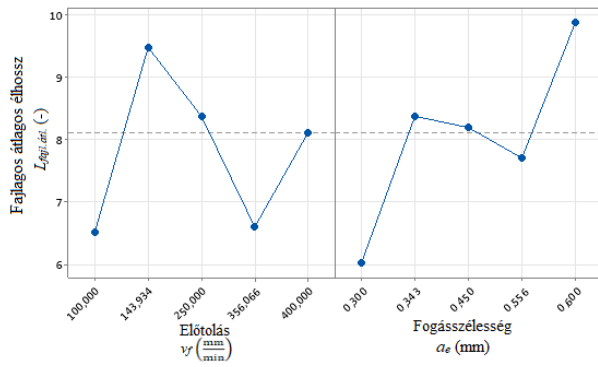
5.5. ábra A többtengelyes palástmaráshoz tartozó fajlagos átlagos élhosszak



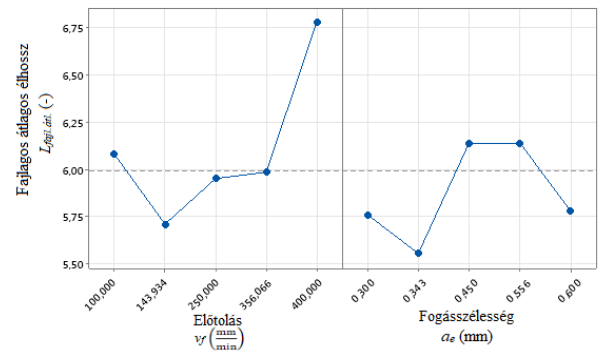
Az előtoló sebesség és a fogásszélesség teljesen más jellegű görbét adnak eredményül, ha a főhatásokat vizsgáljuk (5.8 ábra). Első megfigyelés után elmondható, hogy nem figyelhető meg jelentősebb eltérés, amennyiben a két faktor hatását hasonlítjuk össze. A 5.7-es ábrákon látható ANOVA táblázatok p-Érték oszlopából jól látható, hogy a két faktornak nincs szignifikáns hatása a forgácsolt élek sorjaképződésének nagyságára, amennyiben 95 %-os szignifikancia szinten vizsgáljuk azokat. A 5.9-es ábrán látható kereszt-hatások diagramjai nem párhuzamosak, ami azt bizonyítja, hogy a faktorok kereszt-hatásai jelentősek. A fő- és kereszt-hatás ábrákat, valamint az ANOVA táblázatokat a Minitab szoftverrel készítettem el.

Forrás	DF	Adj SS	Adj MS	F-Érték	P-Érték
Modell	5	8,1432	1,6286	0,53	0,748
Lineáris	2	3,6619	1,8309	0,60	0,577
vf	1	1,5412	1,5412	0,50	0,502
ae	1	2,1206	2,1206	0,69	0,433
Négyszetes	2	1,9532	0,9766	0,32	0,738
vf*vf	1	1,8352	1,8352	0,60	0,465
ae*ae	1	0,2676	0,2676	0,09	0,776
2-érték szorzata	1	2,5281	2,5281	0,82	0,394
vf*ae	1	2,5281	2,5281	0,82	0,394

Forrás	DF	Adj SS	Adj MS	F-Érték	P-Érték
Modell	5	8,1432	1,6286	0,53	0,748
Lineáris	2	3,6619	1,8309	0,60	0,577
vf	1	1,5412	1,5412	0,50	0,502
ae	1	2,1206	2,1206	0,69	0,433
Négyzetes	2	1,9532	0,9766	0,32	0,738
vf*vf	1	1,8352	1,8352	0,60	0,465
ae*ae	1	0,2676	0,2676	0,09	0,776
2-érték szorzata	1	2,5281	2,5281	0,82	0,394
vf*ae	1	2,5281	2,5281	0,82	0,394

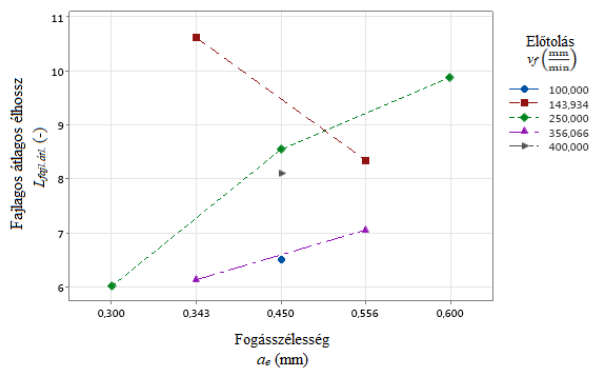


a

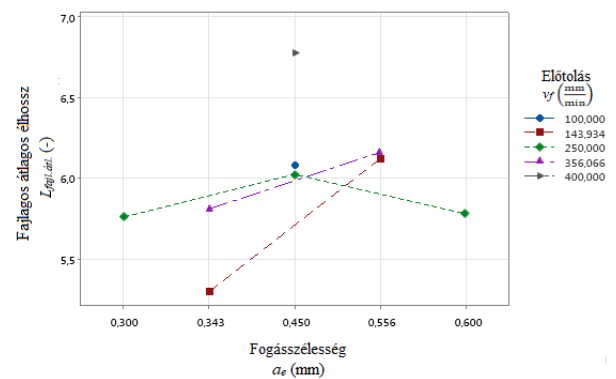


b

5.8 ábra Különböző technológiák főhatásai: a: Palástmarás technológia főhatásai, b: Többtengelyes palástmaró technológia főhatásai



a

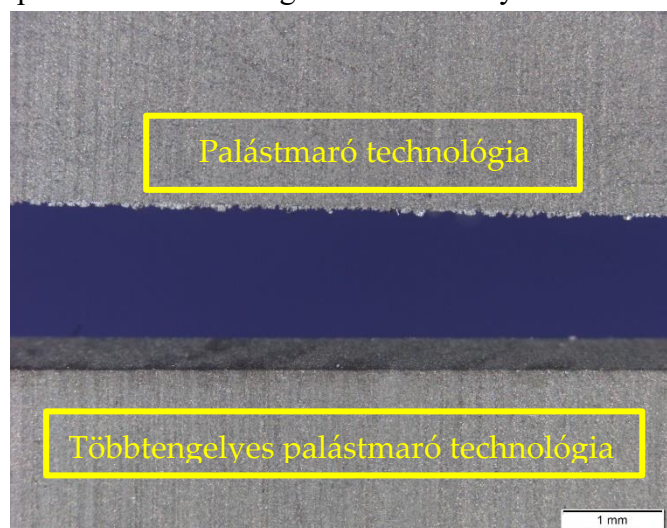


b

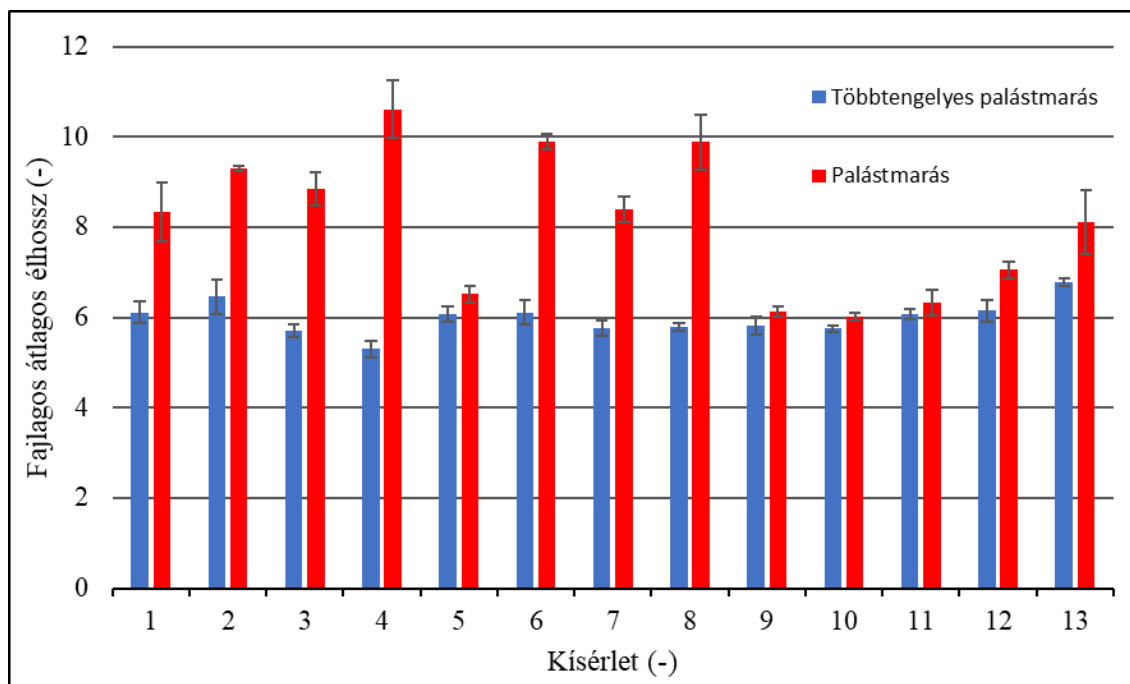
5.9 ábra Különböző technológiák keresztthatásai: a: Palástmarás technológia keresztthatása, b: Többtengelyes palástmaró technológia keresztthatása

5.5. Technológiák összehasonlítása

A két különböző technológia fajlagos átlagos szélességét egy diagramon ábrázolva jól látható, hogy a többtengelyes palástmaró technológia jóval nagyobb minőségű élet eredményezett, mint a palástmaró technológia. Az eredményeket a 5.8-as ábrán foglaltam össze.

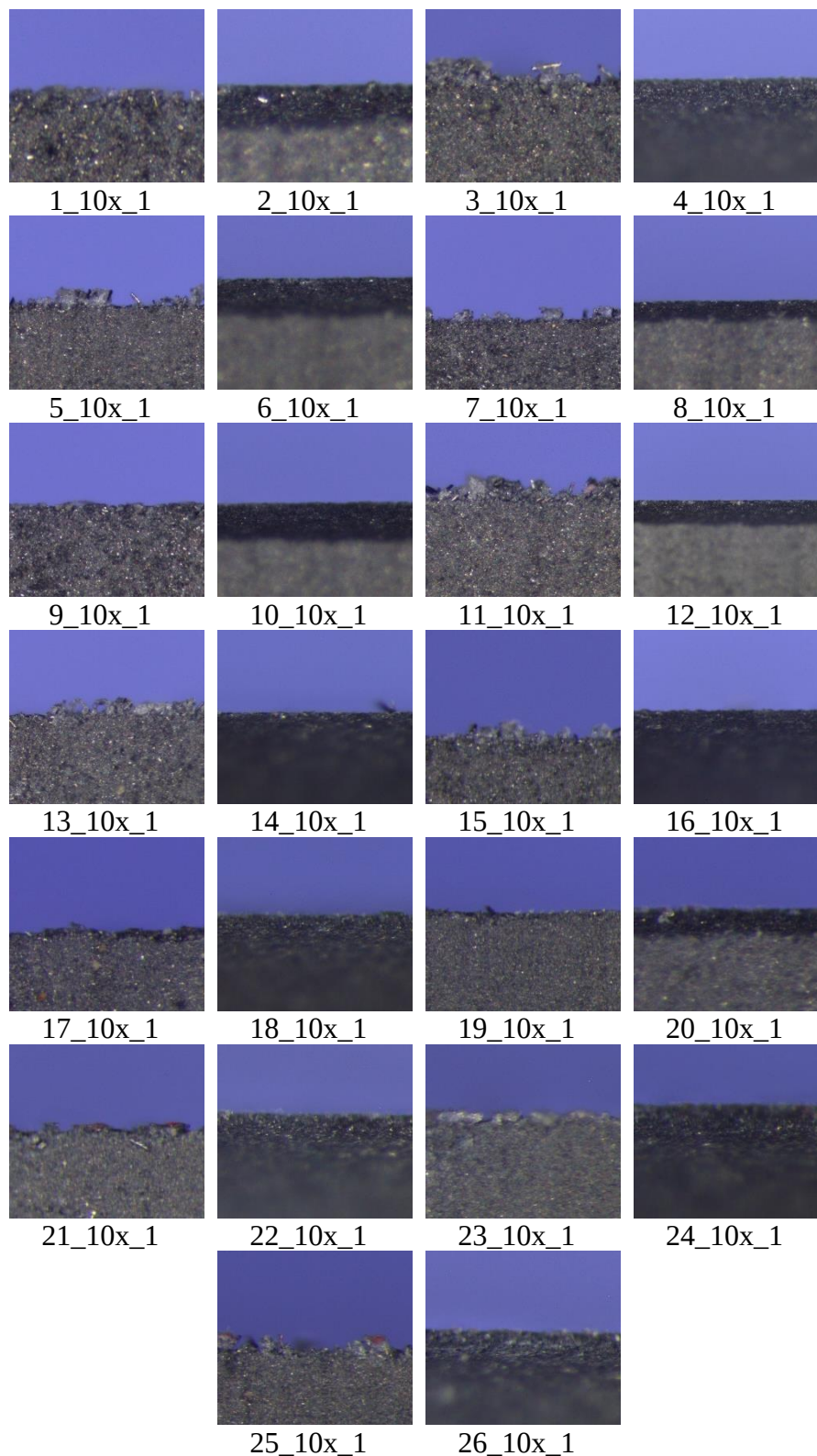


5.7 ábra Két technológia összehasonlítása mikroszkópos felvételen



5.8 ábra A két technológia összehasonlítása a fajlagos átlagos élhosszak alapján

Az 5.9-es ábrán láthatóak a sztereomikroszkóppal készített képek részletei. A képeken jól látható, hogy a palástmaró- és a többtengelyes palástmaró technológia közt lényeges eltérések láthatók. Ezek az eltérések szabad szemmel is jól láthatóak voltak már a kísérletek elvégzése közben. Az 5.7-es ábrán látható, hogy a kiértékelés során sikerült bebizonyítani, hogy az általam fejlesztett technológia kisebb sorjamennyiséget eredményez, mint a hagyományos megmunkálással elkészített éleknél.



5.9 ábra Sztereomikroszkóp által készített képek

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A kísérlet során a szerszámkopás rendkívül alacsony volt, amelyet szemrevételezéssel ellenőriztem. Azonban a kopás nem befolyásolta az eredményeimet, mivel az azonos forgácsolási paraméterre beállított megmunkálások egymás után következtek, tehát csak a megmunkálási technológia változott. Így a kopás hatásától a kísérletek során eltekinthetem.

A kidolgozott kísérlettel sikerült bebizonyítani, hogy a palástmarási és a többtengelyes palástmarási technológia között lényegi különbség van. A többtengelyes palástmarási technológiával elkészített élek lényegesen jobb minőséget mutattak. A többtengelyes palástmarási technológia kisebb mértékben érzékeny a fogásszélesség és az előtoló sebesség változtatására, mint a palástmaró technológia.

A két technológiát több szempont alapján összehasonlíthatjuk. Ezen szempontok alapján könnyebben eldönthető, hogy melyik technológia javasolt egy adott CFRP kompozit éleinek megmunkálásához. A szempontokat a 6.1-es táblázat tartalmazza.

6.1 táblázat Különböző szempontok értékelése		
Szempont	Palástmarás	Többtengelyes palástmarás
CNC program bonyolultsága	Egyszerű	Bonyolult
Szerszámgép kinematikai követelménye	Egyszerű (3 tengely)	Bonyolult (5 tengely)
Megmunkálás időtartama	Rövid	Hosszú
Speciális szerszám alkalmazása a sorja csökkentéséhez	Szükséges	Nem szükséges
Spirálszög megfelelő megválasztása a kompresszió fenntartásához	Szükséges	Nem szükséges
Elkészített munkadarab éleinek sorjássága	Nagy	Kicsi
Letörés elkészítése	Technológián belül nem megoldható	Technológián belül megoldható

7. JÖVŐBELI KUTATÁSI CÉLOK ÉS TERVEK

Jelen kutatásomat szeretném kiterjeszteni a jövőben más megmunkálási technológiákkal annak érdekében, hogy a CFRP kompozitok forgácsolása egyszerűbb legyen az ipar számára. A jövőbeli kutatásaim során szeretném a szerszámkopást is figyelembe venni olyan célból, hogy egy hagyományos szerszámmal is közel annyi munkadarab megmunkálható legyen megfelelő minőségben, mint egy speciális szerszámmal.

Jelen kutatásomban a delaminációt szemrevételezéssel vizsgáltuk. A megmunkálások során nem volt látható a laminált rétegek elválása. Azonban a későbbiekben szeretném számszerűsíteni a delamináció mértékét.

Továbbá megvizsgálnám, hogy a szerszám horonyszöge és a szerszám bedöntése közt milyen kapcsolat áll fenn. A szerszám „B” tengely körüli bedöntési szögét (45°) rögzítettem a kísérletek során. Ezen bedöntési szög nagyságát nem vizsgáltam. Erre további kísérleteket dolgoznék ki.

A szerszámot nem csak a „B”, hanem az „A” tengely körül is be lehetne dönteni, aminek szintén szignifikáns hatása lehet a sorjaképződésre és a delamináció nagyságára.

8. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Perezslai Cs., Geier N. (2020) Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of CFRPs, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2020) 106:3913–3930
- [2] Akira H., Naoya H., Takashi U., Tatsuaki F., High-quality machining of CFRP with high helix end mill, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, Japan, Division of Mechanical Science and Engineering, Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University, Japan
- [3] Geier N. (2019) Egyirányban szénzállal erősített polimer (UD-CFRP) kompozit anyagok forgácsolt alakcsapadtságainak mikro- és makrogeometriai vizsgálata és jellemző mérőszámrendszerének kidolgozása
- [4] Poór D. I. (2021) Új és reciklált szénzáll erősítőanyagú polimer kompozitok összehasonlító forgácsolhatóságai vizsgálata
- [5] Sam Ashwortha, J. Patrick A. Fairclough, Yoshihiro Takikawa, Richard Scaife, Hassan Ghadbeigi, Kevin Kerrigan,1, James Meredith (2019) Effects of machine stiffness and cutting tool design on the surface quality and flexural strength of edge trimmed carbon fibre reinforced polymers, Industrial Doctorate Centre in Machining Science, Advanced Manufacturing Research Centre with Boeing, University of Sheffield, Rotherham
- [6] C. R. Cunningham, A. Shokrani, V. Dhokia (2018) Edge trimming of carbon fibre reinforced plastic, Department of Mechanical Engineering, University of Bath
- [7] Wolfgang Hintze, Dirk Hartmann, Christoph Schütte (2011) Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study, Institute of Production Management and Technology, Hamburg University of Technology
- [8] N. Forintos, T. Czigany (2018) Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review, Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Polymer Engineering, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3, Hungary
- [9] Norbert Geier, Tibor Szalay, István Biró (2018) Trochoid milling of carbon fibre-reinforced plastics (CFRP), Budapest University of Technology and Economics, Department of Manufacturing Science and Engineering, Egrý J. Street 1., Budapest 1111, Hungary
- [10] J. Paulo Davim, Pedro Reis (2004) Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments

- [11] Yigit Karpat, Naki Polat (2013) Mechanistic force modeling for milling of carbon fiber reinforced polymers with double helix tools, Department of Industrial Engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey, Turkish Aerospace Industries (TAI), Ankara, Turkey, Submitted by Bilgin Kaftanoglu (1) Atılım University, Ankara, Turkey
- [12] Oliver Pecat, Rüdiger Rentsch, Ekkard Brinksmeier (2012) Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP, IWT Foundation Institute for Materials Science, Badgasteiner Str. 3, 28359 Bremen, Germany
- [13] V. Schulze, C. Becke, K. Weidenmann, S. Dietrich (2011) Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Germany, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Werkstoffkunde I, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Germany
- [14] Gururaj Bolar, Advith K. Sridhar, Aashrayi Ranjan (2007) Drilling and helical milling for hole making in multi-material carbon reinforced aluminum laminates, Department of Mechanical & Manufacturing Engineering, Manipal Institute of Technology, Manipal Academy of Higher Education, Manipal 576 104, Karnataka, India, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Queensland 4072, Australia
- [15] Tobias Gerngross, Dorothea Nieberl (2016) Automated manufacturing of large, three-dimensional CFRP parts from dry textiles
- [16] Qinglong An, Weiwei Ming, Xiaojiang Cai, Ming Chen (2015) Study on the cutting mechanics characteristics of high-strength UD-CFRP laminates based on orthogonal cutting method, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, PR China, Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, PR China
- [17] Hao Li, Xuda Qin, Gaiyun He, Mark A. Price, Yan Jin, Dan Sun (2017) An energy based force prediction method for UD-CFRP orthogonal machining, Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300354, China, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Queens University Belfast, BT5 9AH, United Kingdom
- [18] Fabian Lissek, Jacqueline Tegas, Michael Kaufeld (2016) Damage quantification for the machining of CFRP: An introduction about characteristic values considering shape and orientation of drilling-induced delamination, Institute of Production Engineering and Materials Testing, Ulm University of Applied Sciences, Prittwitzstraße 10, 89075 Ulm, Germany



Kísérleti jegyzőkönyv

1. KUTATÁS CÉLJA

A kutatás céljának rövid és tömör ismertetése.

2. KÍSÉRLETI KÖRNYEZET

2.1. Felhasznált gépek, szerszámok, műszerek és eszközök

- Nűfák GB733 ipari porzívó
- NCT VHIC-130 LINEAR 5 tengelyes megmunkáló központ
- Egyedi tervezésű mobilis tűkötő
- THOMAS 23N1106 (FM100 D6) (D6, egyéln, bevonat nélküli, spirálszög=0 maró)

2.2. Rögzített paraméterek és körülmények

- száraz megmunkálás
- egyenirányú marás
- fordulatszám $n=6000$ 1/min ($v_c=113,4$ m/min)
- Rögzítő csavarok meghúzási nyomaték 3 Nm
- Alkalmazott készlet M1 marókészlet
- A szálirány (v f és szálak közötti bezárt szög)=90 fok
- 45 fokos letörés
- letörés magassága egyenlő a beállított fogásszelésséggel
- Hosszkorrekció =47,046 mm
- Mdb. névleges mérete = $35 \times 22,2 \times 5,3$
- 0,01 mm pontossághú tolómérvővel meghatározva a mdb. méretek

Kutatási alapadatok

Környezet	
Dátum:	2022.10.06.
Helyszín:	BME „G” épület
Hőmérősklet:	
Nyomás:	
Személyzet	
Kísérletvezető:	Tima Tamás Sándor (jegyzőkönyv)
Laboráns 1:	Dr. Geier Norbert (szerszámpép)
Laboráns 2:	Lukács Tamás (porzívó)
Laboráns 3:	
Laboráns 4:	

9. MELLÉKLETEK

9.1. Kísérleti jegyzőkönyv



2.3. Faktorok

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység	Ertekezési tartomány		Szintek száma	Vizsgált szintek
			Legalsó szint	Legfelső szint		
Előtolási sebesség	v_f	mm/min	100	400	5	100; 143,934; 250; 356,066; 400
Fogáskeresztesség	a_p	mm	0,3	0,6	5	0,3; 0,343; 0,45; 0,556; 0,6



3. KÍSÉRLETTERVEZÉSI MÁTRIX

Ssz.	Kísérlet vegrőlaj tási sorrend	Próbate st azonosít ó	Faktorok			Megjegyzés
			v_f (mm/min)	a_p (mm)	Technológia (-)	
T1		T1	400	0,5	PAL	teszt;
T2		T2	400	0,5	PAL	teszt;
1	1	1	143,934	0,556	PAL	belépő sorja, oldalélleken szinte semmi kitörédezés
2	3	2	250	0,45	PAL	belépő oldali sorja, oldalélleken kis kitörédezés
3	5	3	250	0,45	PAL	belépő oldali sorja, kitépésnél hangos zaj, oldalélen kevés kitörédezés
4	7	4	143,934	0,343	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés
5	9	5	100	0,45	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés, belépő élnél delamináció
6	11	6	250	0,45	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés
7	13	7	250	0,45	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés
8	15	8	250	0,6	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés
9	17	9	356,066	0,343	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés
10	19	10	250	0,3	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés
11	21	11	250	0,45	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés
12	23	12	356,066	0,556	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés
13	25	13	400	0,45	PAL	belépő sorja, oldalélleken kevés kitörédezés, nagyobb delamináció
14	2	14	143,934	0,556	DPAL	belépő oldalon sorja, oldalél szép, a ferde főgátszelvény 0,5 ezért ismétlés szükséges ennek az ismétlése a 27. szz.kísérlet
15	4	15	250	0,45	DPAL	belépő oldali sorja, oldal szép, kitépésnél hangos zaj videó
16	6	16	250	0,45	DPAL	belépő oldali sorja, oldal szép, kitépésnél hangos zaj
17	8	17	143,934	0,343	DPAL	belépő oldali sorja, oldal szép, kitépésnél hangos zaj
18	10	18	100	0,45	DPAL	belépő oldali sorja minimális, oldal szép, kitépésnél hangos zaj
19	12	19	250	0,45	DPAL	belépő oldali sorja, oldal szép, kitépésnél hangos zaj
20	14	20	250	0,45	DPAL	belépő oldali sorja, oldal szép, kitépésnél hangos zaj
21	16	21	250	0,6	DPAL	belépő oldali sorja, oldal szép, kitépésnél hangos zaj
22	18	22	356,066	0,343	DPAL	belépő oldali sorja, oldal szép, kitépésnél hangos zaj
23	20	23	250	0,3	DPAL	belépő oldali sorja, oldal szép, kitépésnél hangos zaj



24	22		24	250	0.45	DPAL	belépő oldal sorja, oldal szép, kilépésnél hangos zaj
25	24		25	356,066	0,556	DPAL	belépő oldal sorja, oldal szép, kilépésnél hangos zaj
26	26		26	400	0.45	DPAL	belépő oldal sorja, oldal szép, kilépésnél hangos zaj, belépésnél jobban roncsolódott
27	27		27s	143,934	0,556	DPAL	2-es kísérlet ismétlése, belépő oldal sorja, oldal szép, kilépésnél hangos zaj

Alkalmazás:

További megjegyzések:



9.2. Kísérlet CNC kódja

```
%O1001(ELMAR1_kiserlet)
G54 G90 G49
(#####)
#120=5 (2-PALASTMAR,5-FERDEPALASTMAR)
#101=5.3 (Mdb. szelessege-X)
#102=22.19 (Mdb. magassaga-Z)
#103=35 (Mdb. hossza-Y)
#104=35 (Mdb. nullponttol valo y tavlosaga)
(#####)
#105=6 (Szerszamatmero)

#109=0.556 (Fogasszelesseg palastmarasnal)
#110=143.934 (Elotolas palastmarasnal)

#111=6000 (Fordulatszam palastmarasnal)
#112=45 (Bedontesi szog)
#113=#109 (Ferdemarasnal fogasvetel)
#114=47.046 (Hosszkorrekcio - mm)
#115=25 (Elhossz)
(#####)
#3006=(NULLPONT, HOSSZKORR. OK?)
IF[#103+#104]GT150] #3006=(VEGALLAS VESZELY-Y)
IF[#104LT35] #3006=(UTKOZES VESZELY-Y)
IF[#103GT35.5] #3006=(UTKOZES VESZELY-Y)
IF[#102GT45] #3006=(VEGALLAS VESZELY-Z)
IF[#114LT[11.5+#101+5]] #3006=(UTKOZES VESZELY HOMLOKFELÜLETTEL)

M3
G43 Z50 H1
G69.1
G0 X0 Y120
Z50 B0 C0

GOTO#120

N2 (Palastmaras) (ELLENORIZVE)
S#111 F#110
M3
G0 Z[#102-9.9+50]
G68.2 X11.5 Y#104 Z[#102-9.9] I90 J-90 K-90
G53.1
G0 Z[-#101-3]
X5 Y[#103+#105]
X[#105/2]-#109]
(X6)
#3006=(Palastmaras START?)
G65 P1013
#3006=(Kiserlet VEGE)
G0 (G41) X[50-[#102-9.9]]+50]
G40
G69.1
Y160
G0 B0
M5
GOTO100

N5 (Ferde palastmaras) (ELLENORIZVE)
```

S#111 F#110
 M3
 G0 Z[#102-9.9+50]
 G68.2 X[11.5+#101] Y#104 Z[#102-9.9] I90 J-#112 K-90
 G53.1
 (G41) G0 Y[#103+#105]
 X5 Z[-#101-3]
 X[-#113+[#105/2]]
 #3006=(Ferde palastmaras 1. ferde felulet START?)
 G65 P1013
 #3006=(Kiserlet 1. ferde felulet VEGE)
 G40
 G69.1
 G0 Z[#102-9.9+50]

 G68.2 X11.5 Y#104 Z[#102-9.9] I90 J#112 K-90
 G53.1
 (G41) G0 Y-#105
 X-5 Z-5
 X[#113-[#105/2]]
 #3006=(Ferde palastmaras 2. ferde felulet START?)
 G65 P1003
 #3006=(Kiserlet 2. ferde felulet VEGE)
 G40
 G69.1
 G0 Z[#102-9.9+50]

 G68.2 X11.5 Y#104 Z[#102-9.9] I90 J-90 K-90
 G53.1
 (G41) G0 Y[#103+#105]
 X20 Z20
 X5 Z[-#101-3]
 X[-#109+[#105/2]]
 #3006=(Ferde palastmaras 3. sikfelulet START?)
 G65 P1013
 #3006=(Ferde palastmaras 3. sikfelulet VEGE)
 G0 (G41) X[50-[[#102-9.9]]+50]
 G40
 G69.1
 Y160
 G0 B0
 M5
 GOTO100

 (N6) (Ferde homlokmaras) (NINCS ELLENORIZVE)
 S#108 F#107
 M3
 G0 Z[#102-9.9+50]
 G68.2 X11.5 Y#104 Z[#102-9.9] I90 J#112 K-90
 G53.1
 G0 X[#105/2] Y-#105
 Z-#113
 #3006=(Ferde homlokmaras 1. ferde felulet START?)
 G65 P1002
 #3006=(Ferde homlokmaras 1. ferde felulet VEGE)
 G69.1
 G0 Z[#102-9.9+50]

 G0 Z[#102-9.9+50]
 G68.2 X52.3 Y[100-#103-#104] Z[#102-9.9] I90 J#112 K-90

G53.1
G0 X[#105/2] Y-#105
Z-#113
#3006=(Ferde homlokmaras 2. ferde felulet START?)
G65 P1002
#3006=(Ferde homlokmaras 2. ferde felulet VEGE)
G69.1
G0 Z[#102-9.9+50]

G68.2 X11.5 Y#104 Z[#102-9.9] I0 J0 K0
G53.1
G0 X[#105/2] Y-#105
Z-#106
#3006=(Ferde homlokmaras 3. sikfelulet START?)
G65 P1002
#3006=(Ferde homlokmaras 3. sikfelulet VEGE)
G69.1
G0 Z[#102-9.9+50]
GOTO100

N100
G0 Z50 B0 C0
Y160

M5
M30
%

%O1003(Palastmaras)
G1 (G41) Y[#103+5]
M99
%

%O1013(Palastmaras)
G1 (G41) Y-#105
M99
%

9.3. Képfeldolgozó algoritmus kódja

```
pic = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "13_10x_3.jpg"]];
pic1 = ImageTake[pic, {900, 1500}];
pic2 = ChanVeseBinarize[pic1];
pic3 = EdgeDetect[pic2]

pic1 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "1_10x_1_1.jpg"]];
pic2 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "1_10x_2_2.jpg"]];
pic3 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "1_10x_3_3.jpg"]];
count = 0;
points1 = ImageScan[If[Mean[#] > 0, count++] &, pic1]
count
count = 0;
points2 = ImageScan[If[Mean[#] > 0, count++] &, pic2]
count
count = 0;
points3 = ImageScan[If[Mean[#] > 0, count++] &, pic3]
count
picv1 = ImageDimensions[pic1];
picv2 = ImageDimensions[pic2];
picv3 = ImageDimensions[pic3];
picv1[[1]]
picv2[[1]]
picv3[[1]]

pic1 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "27_10x_1_1.jpg"]];
pic2 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "27_10x_2_2.jpg"]];
pic3 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "27_10x_3_3.jpg"]];
picvec1 = PixelValuePositions[pic1, 0.01];
picvec2 = PixelValuePositions[pic2, 0.01];
picvec3 = PixelValuePositions[pic3, 0.01];
Export["27_10x_1_1.txt", picvec1]
Export["27_10x_2_2.txt", picvec2]
Export["27_10x_3_3.txt", picvec3]
```