

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

GYÁRTÁSTUDMOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK

BUKOR LEVENTE

TDK DOLGOZAT

Síkmarás hatásai a szénszállal erősített polimer
(CFRP) kompozitok felületi minőségére

The effects of face milling on the surface quality
of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP)
composites

Konzulens:

Dr. Geier Norbert

adjunktus

Budapest, 2024

Tartalomjegyzék

Előszó	II
Jelölések jegyzéke	III
1 Bevezetés	1
1.1 Célkitűzés	1
1.2 Áttekintés	2
2 Szakirodalmi áttekintés	3
2.1 Szénszállal erősített kompozit anyagok tulajdonságai	3
2.2 Ortogonális forgácsolási vizsgálatok	5
2.3 Élmarási és horonymarási vizsgálatok	9
2.4 Síkmarási vizsgálatok	11
3 Kísérlettervezés, megvalósítás és felhasznált módszerek	13
3.1 Kísérlettervezés	13
3.2 Kísérleti környezet és körülmények	15
3.3 Kísérletek megvalósítása	17
3.4 Kísérletek kiértékelése	19
3.4.1 Forgácsolási erőmérés kiértékelési módszerek	19
3.4.2 Felületi érdesség adatok kiértékelési módszerei	22
3.4.3 Mikroszkóppal készített fotók módszerei	24
3.4.4 Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)	25
4 Eredmények ismertetése és értelmezése	28
4.1 Forgácsolási erő	28
4.2 Felületi minőség	30
4.2.1 Felületi érdesség	31
4.2.2 Felületi integritás	34
5 Összefoglalás	45
6 Felhasznált források	47
7 Mellékletek	50
8 Summary	56

Előszó

A 21. század egyik legmeghatározóbb jelensége az informatika és a technológia robbanásszerű fejlődése. A számítási kapacitás ugrásszerű növekedése lehetővé tette, hogy a legmerészebb ötletek is valóra váljanak, és új távlatokat nyitott az ipari és tudományos kutatások előtt. Az előrehaladás lendülete nem csak az informatika világában érzékelhető, hanem számos más területen is új utakra nyitott ajtót. Ezen technológiai forradalom egyik kiemelkedő eredménye a szénszál erősítésű polimerek (CFRP) széleskörű elterjedése. Bár maga a CFRP technológia nem újdonság, az utóbbi évtizedben vált igazán népszerűvé és elterjedté különböző iparágakban. A technológiai fejlődés által táplált kíváncsiság egyre több kutatót ösztönzött arra, hogy a CFRP forgácsolásának lehetőségeit vizsgálja, hiszen a pontos és hatékony megmunkálás kulcsfontosságú a kiváló minőségű termékek előállításában. Az emberi természet része az állandó fejlődés iránti vágy, amely folyamatosan új kihívások elé állít minket. Jelen dolgozatomban témája az egyirányú szénszál erősítésű polimer (UD-CFRP) anyagok síkmarási kísérletei és a felületi minőség vizsgálata. Célom, hogy hozzájáruljak ezen anyagok megmunkálási mechanizmusainak megértéséhez, és ezzel előmozdítam az ipari folyamatok fejlődését.

Kutatásom alatt sok segítséget kaptam, és szeretném megköszönni mindenkinek, aki hozzájárult ezen kutatás létrejöttéhez. Elsősorban szeretném megköszönni Dr. Geier Norbert adjunktusnak a témavezetést, a szakmai irányítást és a szénszállal erősített polimer kompozitok forgácsolás kutatásterületének bevezetését. Szeretném megköszönni Tima Tamás Sándor doktorandusz hallgatónak a segítségét a felületi érdesség mérő műszer beállításaival és használatával kapcsolatban. Szeretném megköszönni Pinke Balázs Gábornak a Polimertechnika Tanszék tanszéki mérnökének a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat során nyújtott közreműködését. Szeretném megköszönni Bíró Attilának a kísérletek és a kiértékelések során nyújtott aktív segítségét. Szeretném megköszönni Belső Mátyás BSc hallgatónak és Kálmán Dávid BSc hallgatónak a kísérletek során nyújtott segítségüket. Továbbá szeretném megköszönni a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszéknek, a BME Polimertechnika Tanszéknek az eszközök és egyéb mérőberendezések biztosítását. Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2019-2.1.11-TÉT-2020-00203 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

Budapest, 2024. november 10.

Bukor Levente

Jelölések jegyzéke

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
a_p	Fogásmélység	mm
F_e	Eredő erő	N
F_x	X irányú erő	N
F_y	Y irányú erő	N
F_z	Z irányú erő	N
f_z	Fordulatonkénti előtolás	mm
i	Fogások száma	-

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
ψ	Szálorientációs szög	°

Rövidítések

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
ANOVA	Varianciaanalízis
CFRP	Szénszállal erősített polimer
CNC	Számítógépes számjegyvezérlés (Computer Numerical Control)
NC	Számjegyvezérlés (Numeric Control)
SEM	Pásztázó elektronmikroszkóp
UD	Egyirányú

1 Bevezetés

1.1 Célkitűzés

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok használata egyre elterjedtebb több különböző területen is, mint például a repülőgép iparban [1], a sporteszközök gyártásában [2], és az űrtechnológiában [3]. A széleskörű felhasználásuk, és elterjedésük annak köszönhető, hogy kitüntetett irányokba lehet javítani a szerkezetek szilárdságát, és emellé a sűrűségük is kisebb, mint egy hasonló mechanikai tulajdonságokkal rendelkező fémeknek [4].

A kompozit anyagokból készült szerkezeteket közel kész formára gyártják, de előfordul, hogy utólagos megmunkálást kell rajtuk elvégezni a gyártás során előforduló méretpontosság és alakhibák miatt. Utólagos megmunkálásra adnak indokot különböző funkcionális követelmények is, mint például egy furat megmunkálása. A kompozit anyagok, azon belül a szénszállal erősített polimerek esetén a megmunkálás igen körülményes és sok kihívást rejt magában, az inhomogén szerkezet, és az erősítőszálak iránya miatt [5]. A megmunkálás a legtöbb esetben valamilyen hagyományos forgácsolási eljárás (fűrés, marás), de előfordulnak egyéb nem hagyományos megmunkálások, mint például a vízsugaras vágás [6] vagy különböző lézeres megmunkálási technológiák [7].

A leggyakrabban szükséges geometriák a furat, és kontúrkialakítás. A furatokat a legtöbb esetben fűréssal állítják elő, ahol az egyik fő kérdés a delamináció kialakulása a furat be- illetve kilépő pontján [8], ezen kívül speciális marási szerszámpályákat is vizsgáltak, a furat kialakítására [9]. A kontúr geometria kialakítása teljesen más irányból közelíti meg a forgácsolást, mivel ebben az esetben a gyártási folyamat során visszamaradt anyagot távolítjuk el, így biztosítva a megfelelő élgeometriát. A CFRP anyagok kontúrjának kialakítására megfelelő technológia a hagyományos élmarás, amellyel megfelelően sima, és pontos méretű felületet tudunk létrehozni [10] [11]. Síkfelületek kialakítására vonatkozóan kevés kutatás elérhető jelenleg, de fellelhetők olyan kutatások, amelyek az anyag viselkedését ortogonális forgácsolással vizsgálják. Az ortogonális forgácsolás napjainkban már kevésbé van jelen, de a forgácsolási alapeszméket tartalmazza, az összes további forgácsolási technológia erre épül. Ezek a kutatások közül jó pár foglalkozik a forgácsolás után létrejövő felülettel, így jó párhuzamot lehet vonni a síkmarás hatásaival a CFRP kompozitok esetén [12–14].

Az előzőekben említett megállapítások alapján döntöttem úgy, hogy a CFRP kompozitok síkmarásának felületi minőségre gyakorolt hatásaival fogok foglalkozni. Ezzel a kutatással, nem csak az volt a célom, hogy egy iparban felhasznált alkatrész felületi minőségét próbáljam jobbá tenni, hanem hogy át lehessen látni, hogy pontosan milyen módon hat a síkmarás a CFRP anyagok felületére. Ezen kívül fontosnak tartottam, hogy a kutatásom kiindulópontot adhasson más kísérletekhez vagy egy eddig használt munkadarabot tudnak újra hasznosítani további kutatási célokkal.

1.2 Áttekintés

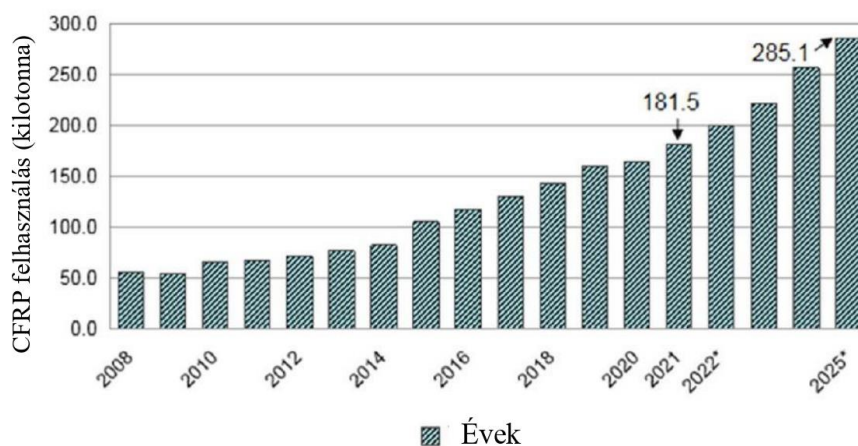
Az első fejezet a téma rövid ismertetését, és a témaválasztásom motivációját mutatja be, valamint a dolgozat strukturális felépítését. A második fejezet foglalkozik a CFRP anyagokkal, és azon hagyományos forgácsolási eljárásokkal, amelyek kötődnek a témámhoz. A szakirodalmi kutatás erősen hozzájárult, hogy megfelelő kísérleteket tervezzek, és a módszeres kiértékelések segítően kapcsolódjanak a témához. A harmadik fejezet foglalkozik a kísérletek megtervezésével, a kísérleti környezet bemutatásával, ezen kívül ebben a fejeztben kaptak helyet a kísérlet során gyűjtött adatok kiértékelési módszereinek taglalása. A negyedik fejezetben ismertetem és értelmezem a kísérleti adatok alapján megállapított eredményeket. Az ötödik fejezetben röviden összefoglalom a dolgozat során elvégzett munkát.

2 Szakirodalmi áttekintés

A következő fejezetben ismertetem a kutatásomhoz szorosan kapcsolódó szakirodalmi áttekintést. Ebben a fejezetben kitérek a CFRP anyagok felhasználására és tulajdonságaira, majd mivel a CFRP kompozitok síkmarásával kapcsolatban nem lelhető fel szakirodalom, emiatt a síkmaráshoz legközelebb eső forgácsolási lehetőségek szakirodalmát ismertetem.

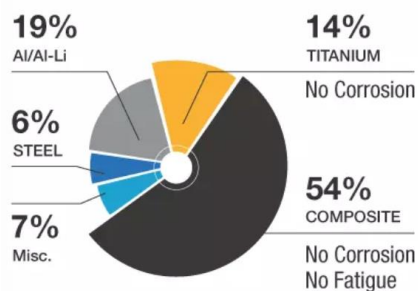
2.1 Szénszállal erősített kompozit anyagok tulajdonságai

A kutatásom középpontját képezték a szénszállal erősített polimer kompozitok, amely anyagok felhasználása növekedett az elmúlt évtizedekben. A népszerűségi ugrás köszönhető az egyre jobban fejlődő gyártástechnológiának és a kiváló mechanikai tulajdonságok mellé társuló kis sűrűségüknek. A népszerűségüket mutatja a 2-1. ábra. Előszeretettel használják olyan ipari területeken, ahol a tömegcsökkentés az egyik legfontosabb cél, viszont a szerkezet szilárdságát nem lehet csökkenteni, sőt előnyösebb lenne növelni. Ilyen kiemelten fontos ipari területek a repülőgépipar, az űrtechnológia, és az autóipar [15]. A repülőgépek esetén könnyű belátni, hogy a tömegcsökkentés hatására nagyobb méretű, több utas vagy áruszállítására képes üzemanyaghatékonyabb járműveket tudunk létrehozni, anélkül, hogy esetleges drasztikus szerkezeti gyengítésekkel kellene ellensúlyozni az előnyöket [16]. Ezen kívül még egy fontos tulajdonsága a polimer kompozitoknak, hogy ellenállók a korrózióval szemben [17].



2-1. ábra CFRP anyagok felhasználása az elmúlt évtizedekben *előrejelzés [15]

A350 advanced materials composition

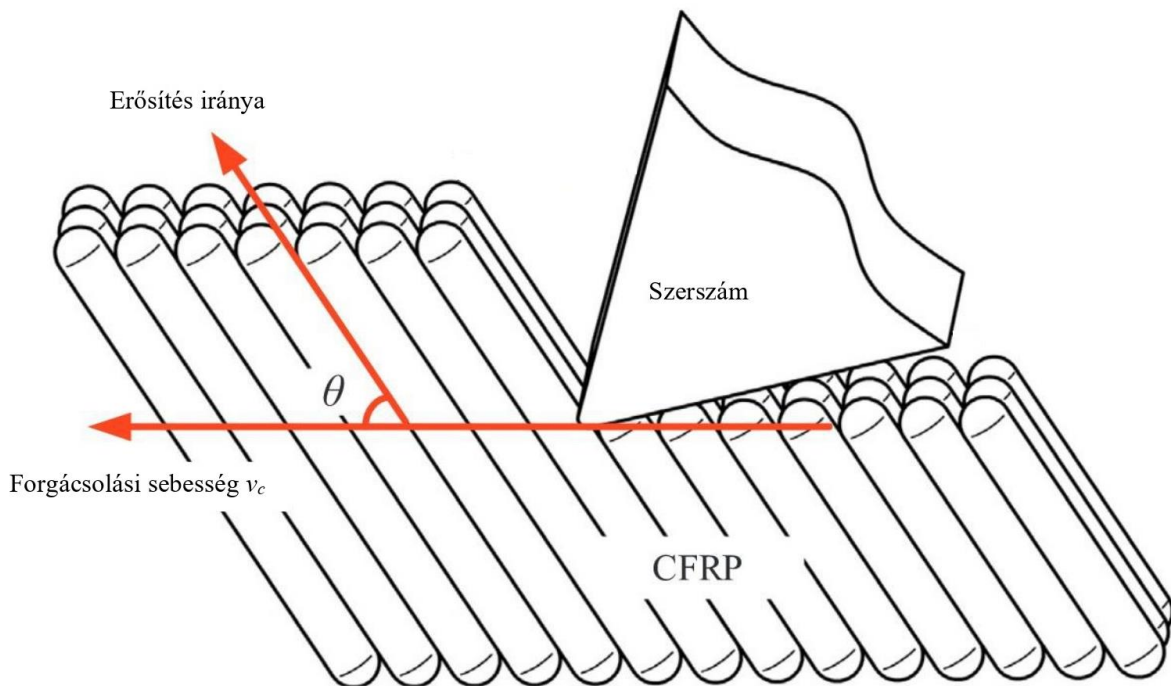


2-2. ábra Airbus A350-1000 típusú repülőgép kompozit anyag felhasználása [18]

A kompozit anyagok fő tulajdonsága, hogy minimum két különböző anyagból épülnek fel, egy erősítő anyagból, és egy befoglaló anyagból. A szálerősített kompozitok egyik alkotóeleme az erősítőszál, amely azt a célt szolgálja, hogy egy kitüntetett irányba feleljen meg a szerkezet a nagyobb terhelések ellen. A mérnöki gyakorlatban a terhelés és az igénybevétel jól meghatározható vonalak mentén történik, amely vonalakon nagyságrendekkel nagyobb szilárdságra van szükség, és ebben az esetben tudnak megoldást nyújtani a szálerősített kompozit anyagok [4]. A kutatásom során egyirányba szénszállal erősített polimer kompozitot (UD-CFRP) használtam, amely anyag esetén az erősítőszál szénszál, a befoglaló anyag pedig valamilyen másik polimer anyag (epoxi gyanta), de ezen két összetevőn kívül a szénszálak csoportosítására használnak kötegelő szálakat [19]. A kötegelő szálak segítik a gyártást, mivel nem szálanként kell az irányokra figyelni, hanem elég a kötegeket a megfelelő irányba helyezni, legyen szó akármilyen gyártási technológiáról [20]. A gyártás során előfordul, hogy levegő marad a mátrixanyagban, amely az anyag megmunkálása során lesz a leginkább látható. A légbuborékoknak viszont nem csak esztétikai hátrányaik vannak, hanem közvetlenül rontsolják a felületi érdességet, és közvetett módon is rontsolást okoznak, mivel helyet adnak a megmunkálás során létrejött törmeléknek, és egyéb szennyezőanyagoknak [19]. Az általam használt munkadarabokat kézi laminálással készítették 9 μm -es átmérőjű szénszálakból.

2.2 Ortogonális forgácsolási vizsgálatok

A CFRP kompozitok forgácsolási megmunkálása az anyag inhomogenitása és anizotrópiája miatt nehéz feladat. A forgácsolás során a szénzsálak erősen koptatják a szerszámot, emiatt speciális bevonatú szerszámokkal érdemes megmunkálni [10], [20]. Az egyirányú szénzállal erősített polimerek esetén fontos erre a tudományterületre jellemző tényező bevezetésével tették lehetségessé ezen anyagok sajátosságainak leírását. Ez az új tényező a szálvágási szög, amelyet az ortogonális forgácsolás esetén a legegyszerűbb bemutatni [14], [21]. A szálvágási szöget úgy határozták meg, hogy a szerszám forgácsolási sebessége a szálerősítés irányával bezárt szög. Ezt a szálvágási szöget mutatja a 2-3 ábra. Az ortogonális forgácsolást az ipar már ritkábban használja, de az anyagok forgácsolási viselkedésének vizsgálatára megfelelő módszer [22], így jó kiindulási alapot tud adni a síkmarás megértéséhez.

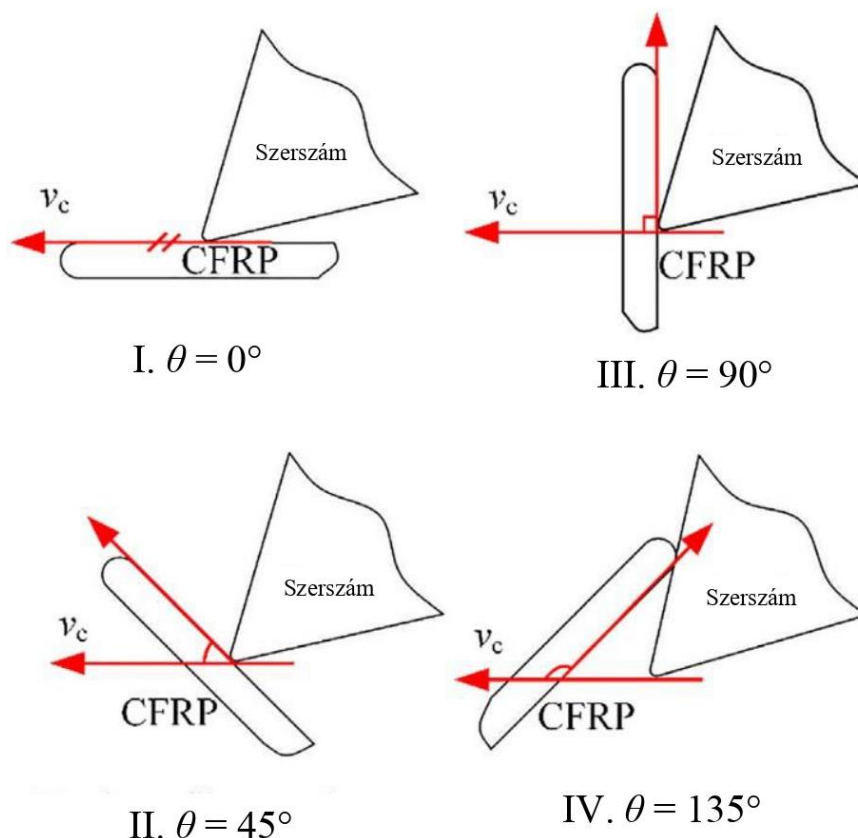


2-3. ábra Szálvágási szög UD-CFRP kompozitok esetén [14]

Az ortogonális forgácsolási kísérletek során több faktor hatását is figyelembe vették a kialakított felületi minőség szempontjából. Több kutatás is kimutatta, hogy a legfontosabb faktor a szálvágási szög [12–14], [23],[24],[25]. A különböző szálvágási szögek alapján négy csoportra szokták bontani a forgácsképződési mechanizmusokat, a 2-4. ábrán látható módon. Az *I.* csoport a $\theta = 0^\circ$ amely esetben a szerszám axiális irányú erőt fejt ki a munkadarabra, és ennek hatására a szálak kihajlanak, és üregeket (delaminációt) hoznak létre. Ebben az esetben előfordul, hogy ha a szál kihajlása nagyobb mint egy kritikus szint, akkor a szálak megrepednek, és elválnak a felülettől [12], [13], [19]. A *II.* csoportba a $\theta = 45^\circ$ esetek tartoznak, ekkor a szerszám nyomó igénybevétele okozta nyírással vágódnak el a szálak, amelyek mikro repedéseket hoznak létre a felületen, amely a rontja a felületi minőséget [12], [13], [19]. A *III.* csoportba tartoznak a $\theta = 90^\circ$ esetek, ahol a szálakat a szerszám nyomásának hatására szabályos módon vágódnak el, így egy sima, kevesebb üreget tartalmazó felületet kapunk [12], [13], [19]. A *IV.* egyben utolsó csoportba a $\theta = 135^\circ$ tartozik, amely esetben a szerszám oldal irányú nyomást fejt ki a szálakra, amely hatására a szálak elhajlanak, és egyes esetekben kihúzódnak a mátrix anyagból és a rugalmas deformációs szakaszban vágódnak vagy törnek el. Az elválás után a szálak visszahúzódnak, ezzel rossz felületi minőséget eredményezve [12], [13], [19]. A 2-1. táblázat röviden összefoglalja, hogy a szálvágási szög alapján kialakított csoportok felbontásával, milyen a jellemző szálkialakítási mechanizmus, ezen kívül az utolsó oszlopban a várható felületi minőség sorrendjét írja le, ahol az ***** jelenti a legjobb felületet a * pedig a legrosszabbat.

2-1. táblázat Szálakra jellemző hatása szálvágási szög csoportjaira bontva

Csoport	Szálvágási szög °	Jellemző hatás a szálakra	Felületi minőség
I.	0	kihajlás	***
II.	45	nyírás okozta repedések	**
III.	90	nyomás okozta vágás	*****
IV.	135	kihajlás és kihúzás	*



2-4. ábra Szálvágási szög szerint csoportokra bontott esetek [14]

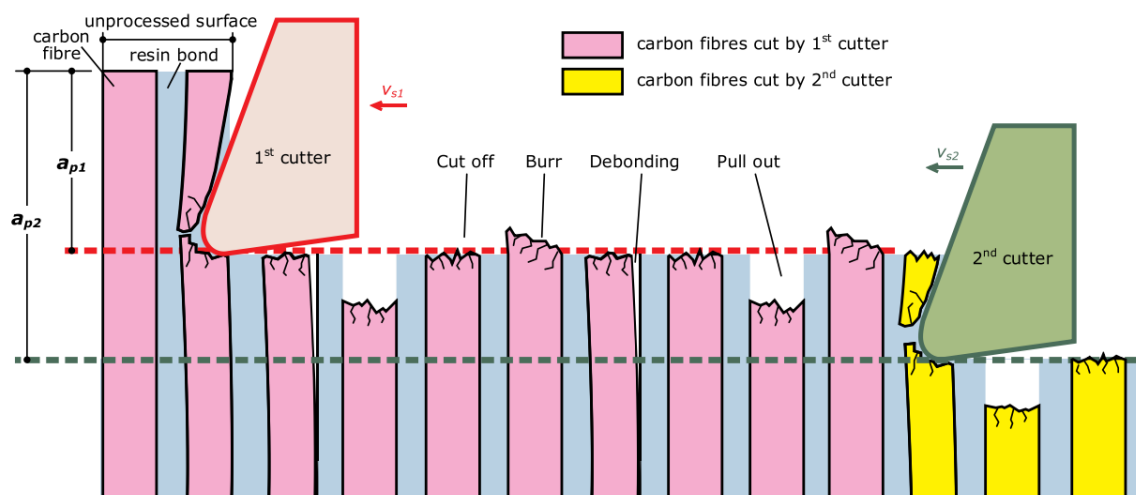
A forgácsolás során viszont más faktorokat is vizsgáltak különböző kutatások folyamán. A két legfontosabb faktor, amelyet az ortogonális forgácsolás során változtatni lehet, a fogásmélység, és a forgácsolási sebesség. Ezek közül egyik faktornak sincs olyan nagy hatása a felületi minőségre, mint a szálvágási szögnek, de a kutatások alapján a forgácsolási sebességet érdemes nagyobbra választani [12]. A fogás mélység már egy érdekesebb faktor, mivel ha túl kicsire választjuk, kisebbre, vagy közel olyan nagyságúra, mint a szálak átmérője, akkor a forgácsolás nehézé válik, ami rontja a felületi minőséget [24].

Ezen előbb említett kísérletek során mindig egy fogásban történt a megmunkálás és a feldolgozatlan felületet vették kiindulópontnak. Ez egy hiányosság, amely egy érdekes kutatási területet nyitott meg még hozzá, hogy a CFRP kompozitok felületi minőségét mennyire befolyásolja az, hogy hány fogásban munkáljuk meg azokat. A CFRP anyagok esetén a fogások számának vizsgálatával csekély számú kutatás foglalkozik, pedig az ipari megmunkálások során előszeretettel alkalmaznak több fogást a felületi minőség javítása érdekében. Ezt vizsgálták Li és munkatársai [26] (következőkben mtsai.), amely kutatásban a fogások számának változtatása esetén két különböző kiértékelést is figyelembe tudtak venni:

- Az első és a második fogás összehasonlítása egy megmunkálás során
- Az egy fogással és a több fogással létrehozott munkadarabok összehasonlítása

Az első és második fogás összehasonlítása során a felületi minőséget nehezen mérhető a megmunkálás során, de szimulációs módszerekkel lehet vizsgálni. A szimuláció kimutatta, hogy az első fogás közben jobban kihúzódtak a szálak, mint a második fogás esetén. Ezt a jelenséget úgy tudták megmagyarázni, hogy az első fogás során kihúzott szálakat a második fogás nem tudta kihúzni, így kevesebb lett a kihúzott szálak száma és a kihúzás mértéke is, ami azt jelenti, hogy az első fogás során létrejött hibák javítják a második fogás által kialakított felületi minőséget. Ezt az érdekes megállapítást mutatja a 2-5. ábra.

Az egy illetve több fogás összehasonlítása már egyszerűbb feladat volt. Ebben az esetben is kisebb száلكihúzóásokat mértek a megmunkált felületen a második fogás esetén. Li és mtsai [26] az összes vágás végleges mélységét mindkét kísérlet esetén azonosnak választották, így két magyarázatot is adtak a jelenségre, de valószínű, hogy minkető hatás befolyásolta az eredményt. Az első magyarázat az előző bekezdésben tárgyalt előzetes szál kihúzás okozta felületi minőség javulás, míg a második magyarázat az, hogy a két fogás esetén két kisebb fogásmélységgel munkálták meg az anyagot, míg az egy fogás esetén egy nagyobb mélységgel dolgoztak.

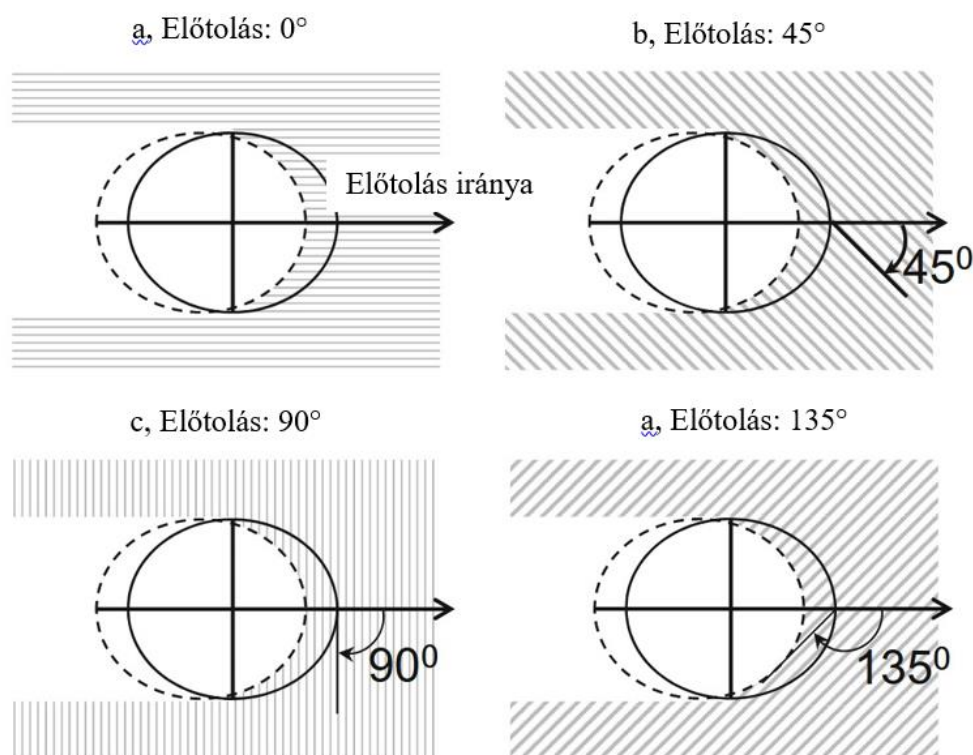


2-5. ábra Sematikus ábra a több fogást alkalmazó megmunkálásról [26]

Összefoglalva Li és mtsai [26] arra a következtetésre jutottak, hogy a több fogással kivitelezett megmunkálás jobban megmunkált felületi minőséget, és al-felületi minőséget eredményezhet, ami jobb mechanikai tulajdonságokat biztosíthat a CFRP alkatrészeknek.

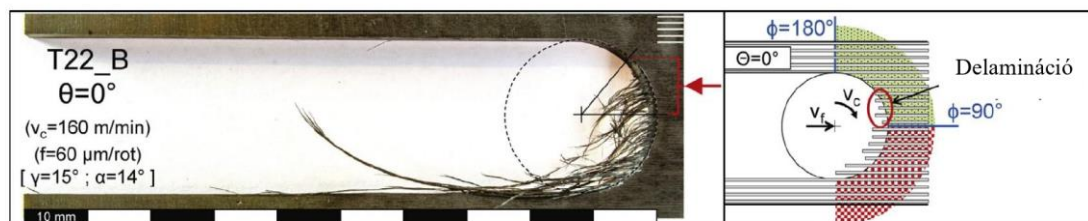
2.3 Élmarási és horonymarási vizsgálatok

Az ortogonális forgácsolással fel tudunk építeni olyan modelleket, amelyek segítik megérteni az anyag működését, így párhuzamot lehet vonni ezen kísérletek és síkmarási kísérletek között, viszont az ortogonális forgácsolás során definiált speciális tényező (szálvágási szög) nehezen értelmezhető egy forgó szerszám esetén. A forgó szerszámmal való CFRP forgácsolás legtöbb kutatott területe a fűrés, az élmarás és a horonymarás. A fűrés során a szerszám, általában csak egyirányú mozgást végez, így ez a megmunkálás nem áll olyan közel a síkmaráshoz, emiatt ebben a kutatásban ezzel a forgácsolási eljárással nem fogok foglalkozni. A különböző marások esetében bevezetésre került a szálorientációs szög (ψ), amely kiküszöbölve a szerszám, és az azzal együtt forgó forgácsoló sebesség irányának változását, az előtoló sebesség irányának, a szálerősítések irányával bezárt szögét vette alapul [21],[27–29]. A szálorientációs szög egy lehetséges értelmezését mutatja be a 2-6. ábra. Az előző fejezetben ismertetett szálvágási szögek csoportokra bontása a marások során is megfeleltethető [30]. A forgácsolási mechanizmusok ugyanúgy játszódnak le mindkettő forgácsolás során, mivel a szálvágási szög ugyanúgy értelmezhető, hogyha csak egy élt veszünk figyelembe a tényleges forgácsolás pillanatában, azaz abban a pillanatban, amikor a forgácsolási sebesség és az előtoló sebesség párhuzamosak egymással [21],[31].



2-6. ábra Szálorientációs szög értelmezése horonymarás esetén [28]

Minden anyag marása esetén fontos kiválasztani a marási technológiát, ami egyenirányú és ellenirányú lehet. Több kutatás vizsgálta, hogy melyik forgácsolási technikával lehet jobb felületet kialakítani, az általános fémek esetén a legtöbb esetben az egyenirányú marással lehet kedvezőbb felületet kialakítani. Az UD-CFRP anyagok esetén fontos tényező, hogy a forgácsolás során milyen szögben találjuk el a szálakat először, így előfordulhat egy megmunkálás során, hogy egyes szakaszokon jó felületi minőséget kapunk, míg más szakaszokon, ahol nem optimális a vágási szög, ott rosszabb minőségű felületet hozunk létre [27]. A rosszabb eset, azzal magyarázható, hogy a forgácsolás során kihúzzuk a szálakat, és nem elvágjuk. Ezt a felületi minőség változást mutatja a 2-7. ábra. Tehát a marási technológia megfelelő kiválasztása nagyban függ a megmunkálni kívánt alkatrész szálorientációjától [31]. A kísérleteim során síkmarással az egész munkadarabot végig martam, így ezt a hatást ki tudtam küszöbölni.

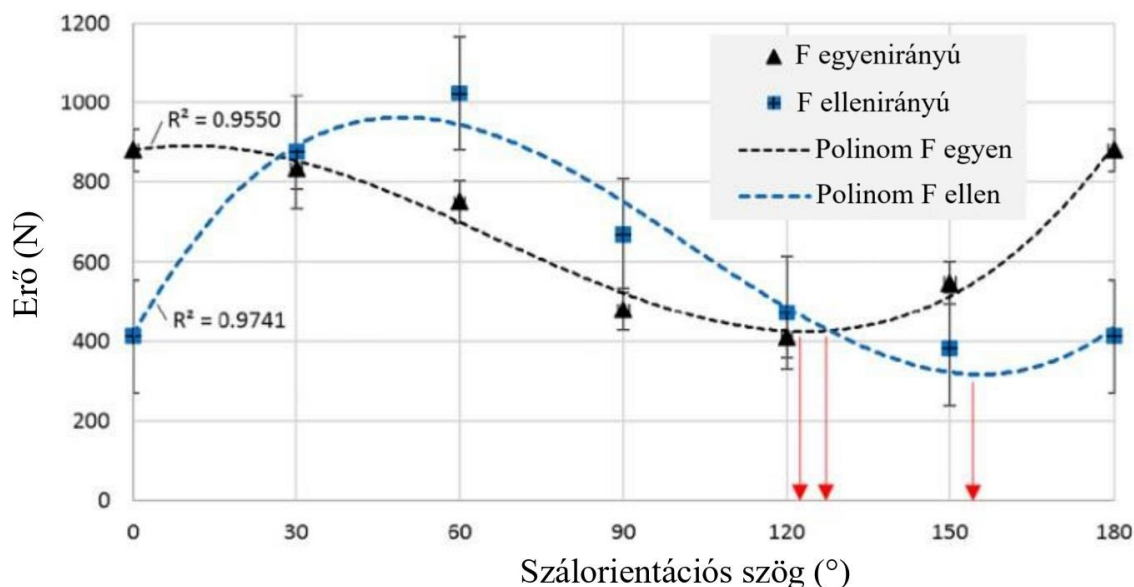


2-7. ábra Marási technológia hatása horonymarás esetén [27]

Ezen marási eljárás során is több kutatásnak sikerült kimutatnia, hogy a legnagyobb hatással, ezen megmunkálás esetén is az erősítőszálak iránya befolyásolta a legjobban, ebben az esetben ezt az értéket szálorientációs szögnek nevezzük [21], [27]. A marás típusú forgácsolások során bevezetésre kerül az előtoló sebesség, amely faktornak van hatása az UD-CFRP felületi minőségére, de nem olyan nagy hatása, mint a szálorientációs szögnek. Minél kisebb előtolást alkalmazunk, annál jobb felületi minőséget tudunk elérni, mivel így egy szerszám él (változatlan főorsó forgási sebesség mellett) kevesebb szállal találkozik, így azokat megfelelőbben tudja elvágni [31], [32]. Ezen kívül az ortogonális forgácsoláshoz hasonlóan a nagy forgácsolási sebesség jobb felületi minőséget vonz magával [33].

A kutatásom során forgácsolási erőmérést is végeztem, de nem ez volt a kutatás fő célja, csupán szerettem volna jobban megérteni, hogy mi történik az anyaggal a forgácsolás közben. A megmunkálás jellegéből adódóan a forgácsolási erőre nagyban lehetett következtetni az élmarási kísérletek alapján. A kutatások kimutatták, hogy szignifikáns hatása van a szálorientációnak, a fogásmélységnek és az eltolásnak a forgácsolási erőre nézve [28], [33],

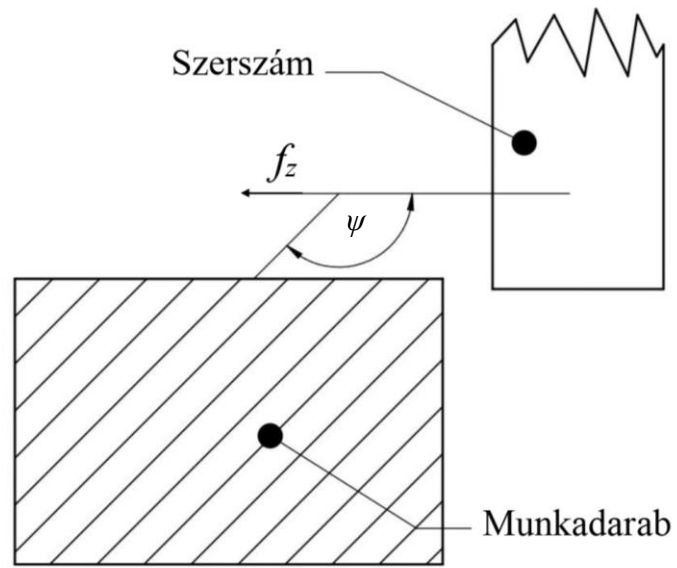
[34]. Geier [34] vizsgálta az egyen illetve ellenirányú marás közben ébredő erőket és azt a következtetést tette, hogy az ellen illetve egyenirányú marás esetén nem egy szálorientációs szögben éri el a minimumot. A 2-8. ábra mutatja a forgácsoló erőket a szálorientáció függvényében. Az előtoló sebesség és a fogásmélység növelésével az egységnyi idő alatt eltávolítandó anyag térfogata növekszik, ami a forgácsoló erő növekedését eredményezi [33].



2-8. ábra Forgácsoló erő változása a szálorientációs szög függvényében [34]

2.4 Síkmarási vizsgálatok

UD-CFRP kompozitok síkmarásáról nem lelhető fel szakirodalom, de az előző alfejezetekben tárgyalt egyéb síkmaráshoz közeli forgácsolások alapján lehet párhuzamokat vonni a folyamatok között. A síkmarás során homlokmarást alkalmaztam, amely során szálorientációs szöget használtam a definíciója alapján. A kísérletem során értelmezett szálorientációs szög a 2-9. ábrán látható, amelyet a szakirodalomban előforduló definíciók alapján alkottam meg [21],[27–29]. A szakirodalmi kutatásom során kevés alkalommal olvastam, hogy a megmunkálni kívánt felületet hogyan készítették elő a kísérleti forgácsolásra. Elképzelhető, hogy jelen kutatásom segíteni fog más kutatásokat, azzal a céllal, hogy a munkadarabokat, próbatesteket ismert mechanizmusokkal, azaz síkmarással készítsék elő.



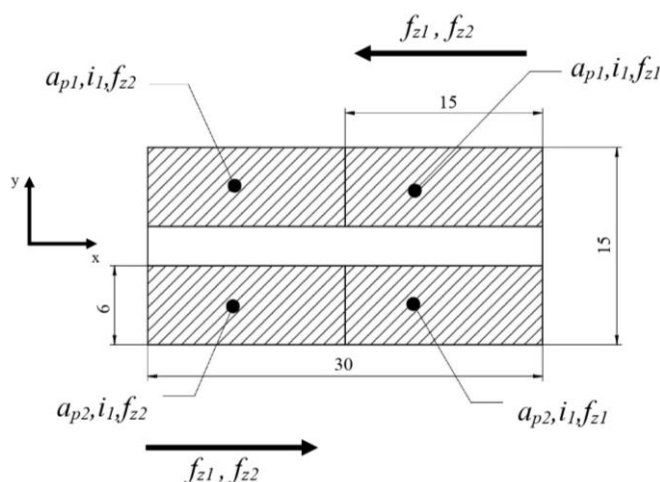
2-9. ábra Szálorientációs szög értelmezése síkmarás esetén

3 Kísérlettervezés, megvalósítás és felhasznált módszerek

Ebben a fejezetben ismertetem a kutatásom során végzett kísérleteket, és a hozzájuk tartozó tervezési és kiértékelési módszereket. Ezen kívül bemutatom a kísérletekhez összeállított környezetet és a kísérlet megvalósítása közben elvégzett feladatokat.

3.1 Kísérlettervezés

A kísérletek során kézi laminációval gyártott és vízvágással 30x15x20 mm-es méretre vágott UD-CFRP munkadarabokat alkalmaztam. Ezeket a munkadarabokat négy különböző száliránnyal gyártották le, ami az első vizsgált faktорот képezte. A további faktoroknak a fogásmélységet, a fogások számát, és az előtolást alkalmaztam két szinten. Három faktor folytonos vizsgálati faktor, a fogások száma pedig kategorikus faktor, amelyek értékeit a kísérletek során használt szerszám katalógusa, és irodalmi kutatások alapján választottam [27], [33], [35]. A választás során a kutatásaimban talált optimális értékeknél kisebb, illetve nagyobb paramétereket választottam, hogy a kísérletek során kimutatható hatást érjek el. A fogások száma esetén az egyes és kettes fogás esetén a fogásmélység azonos maradt. A 32 kísérlet során 8 munkadarabot használtam fel, ami azt jelenti, hogy egy munkadarabot négyfelé osztottam fel, így tudtam az összes kombinációt létrehozni. A kísérletek sorrendjét lekorlátozta a szerszám, mivel nem tudtam megmunkálás közben az anyagba süllyedni. A megkötések miatt munkadarabonként változott a szálorientáció, és a fogások száma, az előbbi a gyártás és darabolás, az utóbbi pedig az NC kód és a kísérletek görbülékenysége okán került kiválasztásra. Egy munkadarabon belül egy oldal hosszán változott az előtolás, és az oldalváltáskor pedig változott a fogásmélység, ahogy ezt a 3-1. ábra is mutatja. A kísérleti mátrixot a pontos sorrenddel a 3-1. táblázat mutatja.



3-1. ábra Munkadarab megmunkálási terv

3-1. táblázat Kísérleti mátrix

Ssz.	Mdb. azonosító	Szálorientációs szög °	Fogásmélység mm	Fogások száma -	Előtolás mm
1	CFRP1	0	1	1	0,05
2	CFRP1	0	1	1	0,15
3	CFRP1	0	2	1	0,15
4	CFRP1	0	2	1	0,05
5	CFRP2	0	1	2	0,05
6	CFRP2	0	1	2	0,15
7	CFRP2	0	2	2	0,15
8	CFRP2	0	2	2	0,05
9	CFRP3	45	1	1	0,05
10	CFRP3	45	1	1	0,15
11	CFRP3	135	2	1	0,15
12	CFRP3	135	2	1	0,05
13	CFRP4	45	1	2	0,05
14	CFRP4	45	1	2	0,15
15	CFRP4	135	2	2	0,15
16	CFRP4	135	2	2	0,05
17	CFRP5	90	1	1	0,05
18	CFRP5	90	1	1	0,15
19	CFRP5	90	2	1	0,15
20	CFRP5	90	2	1	0,05
21	CFRP6	90	1	2	0,05
22	CFRP6	90	1	2	0,15
23	CFRP6	90	2	2	0,15
24	CFRP6	90	2	2	0,05
25	CFRP7	135	1	1	0,05
26	CFRP7	135	1	1	0,15
27	CFRP7	45	2	1	0,15
28	CFRP7	45	2	1	0,05
29	CFRP8	135	1	2	0,05
30	CFRP8	135	1	2	0,15
31	CFRP8	45	2	2	0,15
32	CFRP8	45	2	2	0,05

A kísérlet során állandó paraméterek voltak a forgácsolás iránya, a forgácsolási sebesség, a fogásszélesség, illetve a kísérlet során egy szerszámot használtam. A forgácsolás irányát irodalmi kutatás alapján választottam ki, Zhang és Zhang [30] kísérleteik során arra a következtetésre jutottak, hogy az UD-CFRP anyagok forgácsolása során ellenirányú marás kedvezőbb a jobb felületi érdesség eléréséhez, így a kísérleteim során én is ezt a technológiát alkalmaztam. A forgácsolási sebességet a szerszámkatalógus és a megmunkálóközpont ajánlásai alapján választottam. Annak érdekében, hogy a fogásszélesség állandó maradjon a munkadarabokat a síkmarás előtt kontúrmartam, és az így kiadódó méretek, és a szerszám

átmérőjének figyelembe vétele mellett választottam ki a fogásszélességet. Az állandó paraméterek értékeit a 3-2. táblázat mutatja.

3-2. táblázat Állandó paraméterek

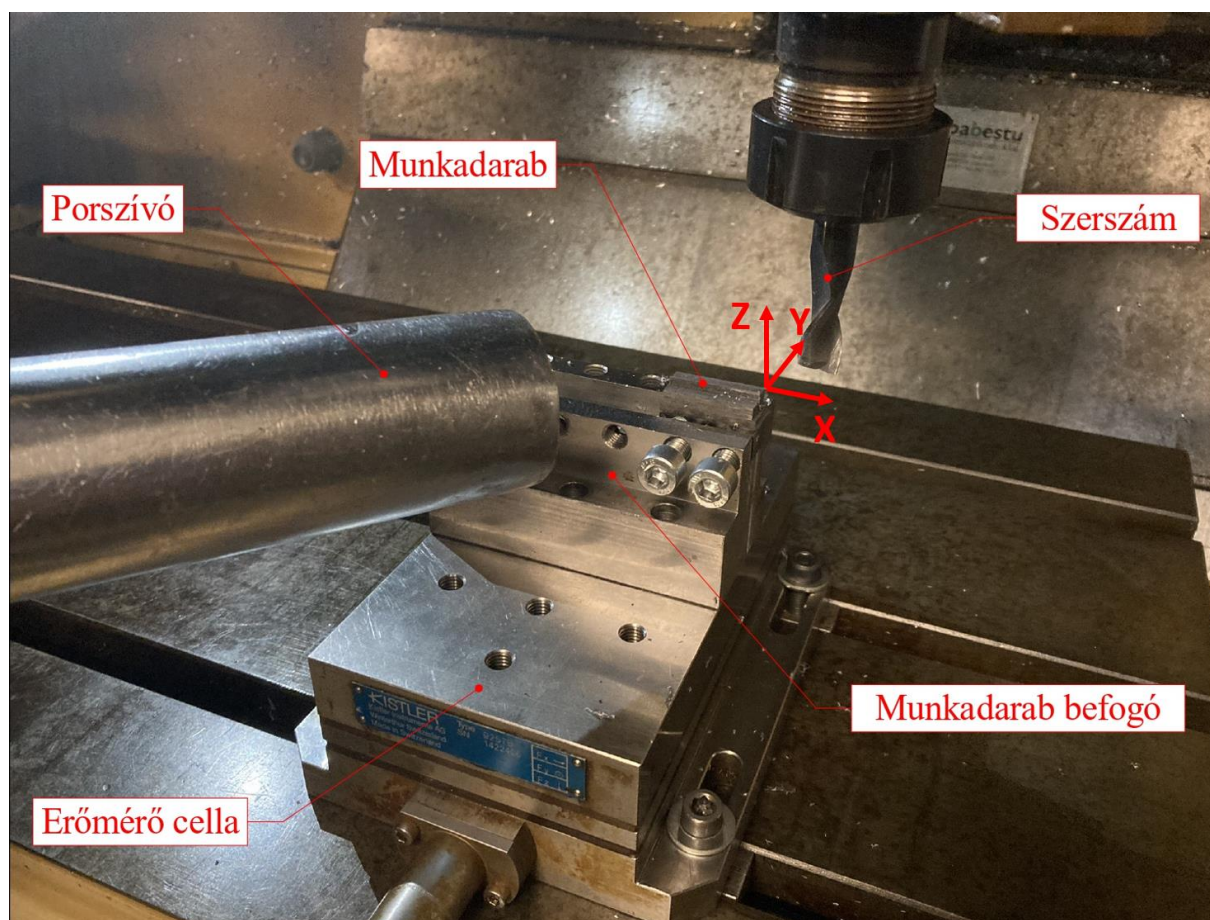
Forgácsolási sebesség m/min	Forgácsolás iránya	Fogásszélesség mm
100	ellenirányú marás	6

3.2 Kísérleti környezet és körülmények

A síkmarási kísérleteket egy Kondia B640 háromtengelyes CNC megmunkálóközponton végeztem. A kísérlet során száraz megmunkálással dolgoztam, mivel a munkadarabok felszívják a hűtőfolyadékot, ami rongálja a kompozit anyagok szerkezetét. A munkatérben létrejövő port a gép károsodásának elkerülése és a kísérleti személyzet egészsége miatt egy Nilfisk GB733 típusú ipari porszívó felhasználásával végeztem. A kísérlet során a síkmarásra, és a kontúrmarásra ugyanazt a Tivoly P652 z2 Ø12 (cikkszám: 82365211200) típusú Alcrona bevonatos maró szerszámot használtam.

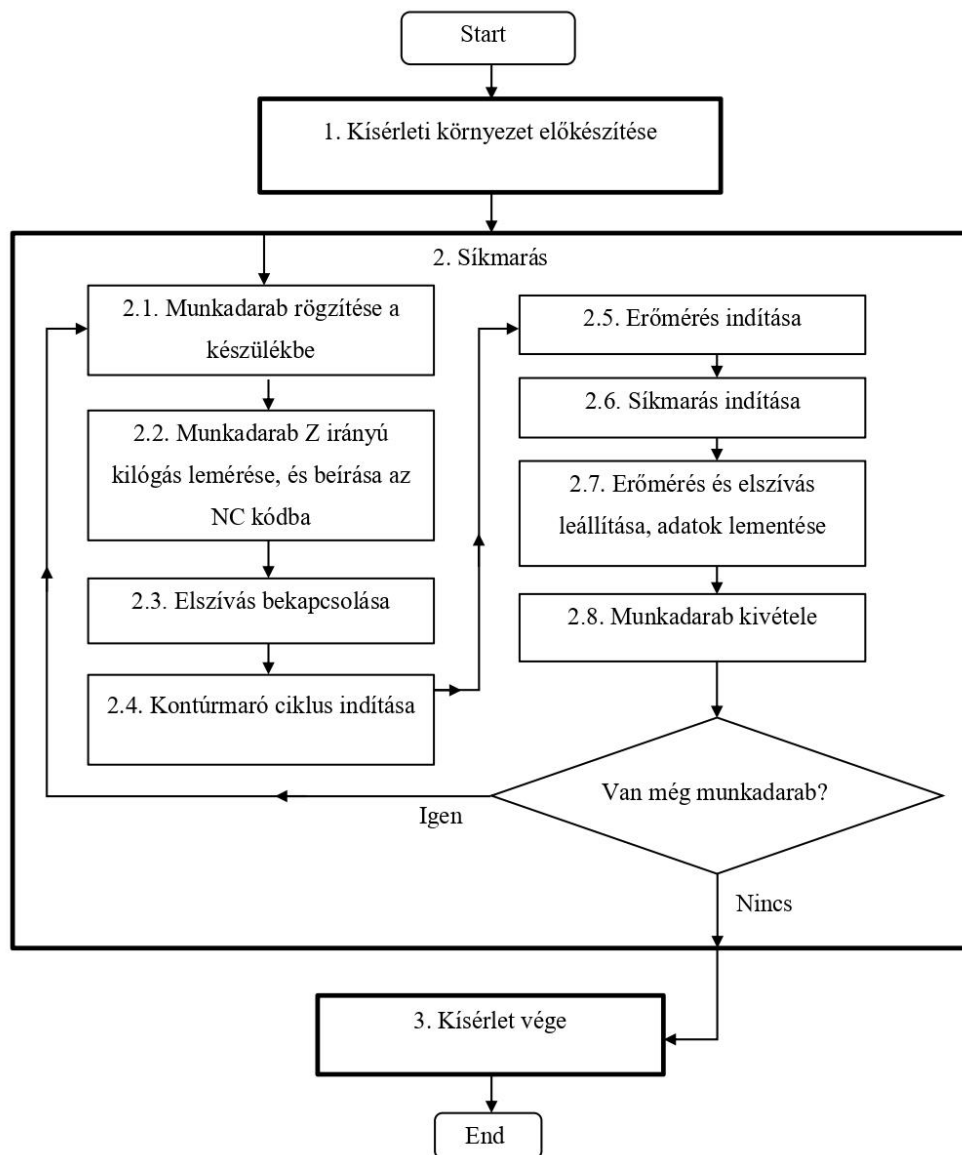
Az erőmérést egy KISTLER 9257B háromkomponenses erőmérő cella végezte el, amely a mért eredményeket továbbította egy többcsatornás KISTLER 5070 töltés erősítőhöz. A felerősített jelek két National Instruments USB-4431 adatgyűjtőkártyára érkeztek, amelyekről egy LabVIEW környezetben írt program segítségével tudtam lementeni az adatokat. A LabVIEW programban volt vezérelhető a mérési frekvencia, amit úgy állítottam be, hogy a szerszám állandó forgása közben 5°-ként mérjen. A megfelelő frekvenciát a mellékletben található képlettel és programmal számoltam ki.

Az erőmérőre a tanszék által biztosított munkadarab befogó készüléket tudtam rögzíteni a 3-2. ábrán látható módon. A munkadarabot a készülékbe a 3-2. ábrán látható módon helyeztem el, és rögzítettem a kísérlet során. A kísérleti elrendezést a 3-2. ábrán ismertetem.



3-2. ábra Kísérlet elrendezése

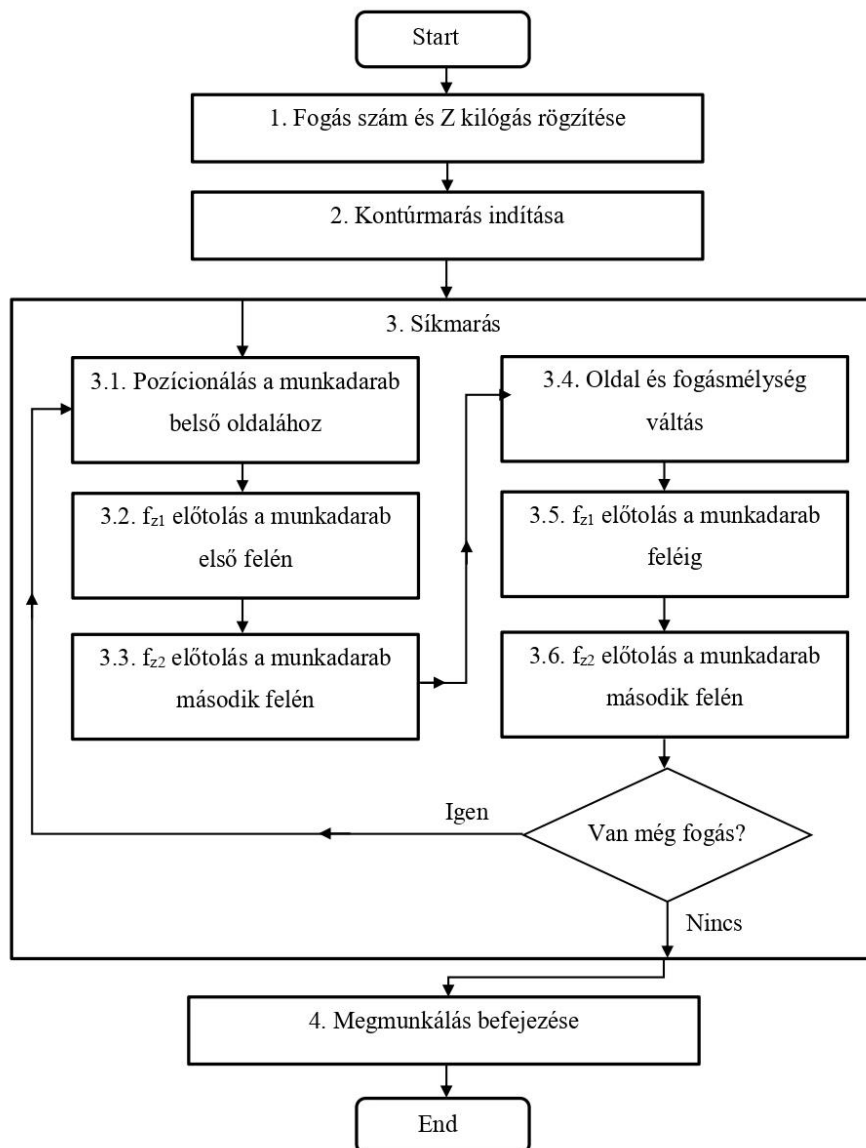
3.3 Kísérletek megvalósítása



3-3. ábra Kísérleti blokkdiagramm

A 3-3. ábrán a kísérleti blokkdiagrammot láthatjuk, ahol az 1. szakasz a kísérlet előkészítése, amely magába foglalja az erőmérőcella, és a készülék összeszerelését, majd bemérését a vízszintes tengelyeken, a szerszám összeszerelését, és bemérését, a munkadarabok szélességének és hosszúságának leérése, a kontúrmarás szélességének meghatározását, nullpont felvételét, az NC program szimulációját, és tesztelését, az erőméréshez szükséges paraméterek beállítását. A 2. szakaszba történt a munkadarabok megmunkálása, ahol fontos a 2.2. lépés, ahol is meg kell határozni a munkadarab Z irányú kilógását, hogy a síkmarás során a névleges forgácsvastagság minden beállítás esetén pontos legyen.

A 3. szakasz a kísérlet befejezése, amely szakaszra abban az esetben lépünk tovább, ha már nincs több megmunkálni kívánt munkadarab.



3-4. ábra NC program blokk diagramja

A 3-4. ábra az NC program blokkdiagrammját mutatja be. Az 1. szakaszban a programba rögzítjük, hogy hány fogás lesz az adott kísérleten, és a munkadarab Z irányú kilógását is. A 2. szakaszban elindítjuk a kontúrmarást. A 3. szakaszban végezzük a síkmarást, ahol először pozicionáljuk a munkadarab belső oldalához a_{p1} fogásmélységre, majd megkezdjük a forgácsolást f_{z1} előtolással, egészen a munkadarab feléig, onnantól f_{z2} előtolással folytatjuk a forgácsolást. A 3. szakasz második felében pozicionálunk a munkadarab külső oldalához, váltunk a_{p2} fogásmélységre, és f_{z2} előtolással kezdjük a megmunkálást a munkadarab feléig, majd f_{z1} előtolással folytatjuk a forgácsolást a munkadarab végéig. Ha van még fogás, akkor a

fogásszámmal megszorozva a mélységet folytatjuk a síkmarást a 3.1-es pontól, ha nincsen több fogás, akkor pedig tovább lépünk a 4. szakaszra, és befejezzük a megmunkálást.

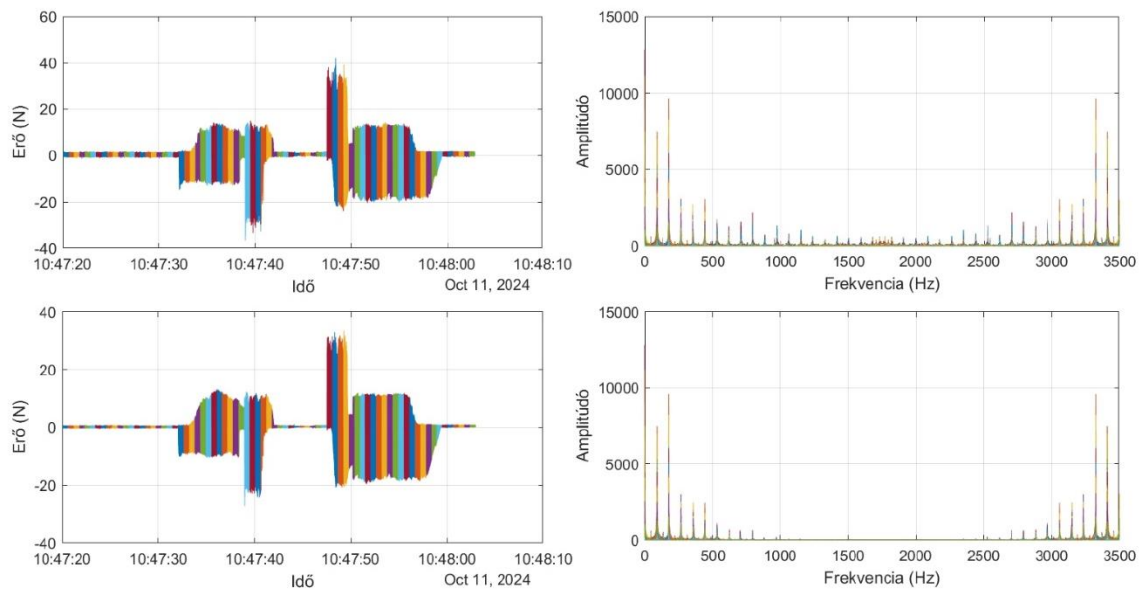
A kísérletek valós történéseiről, feljegyzéseiről a mellékletben található kísérleti jegyzőkönyvben olvashatnak részletesebben.

3.4 Kísérletek kiértékelése

A kiértékeléseket a kísérletek utáni hetekbe végeztem el. Fontos volt figyelmem a kiértékelések sorrendjére, mivel a pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) való mérés előtt a munkadarabokat fel kellett darabolni.

3.4.1 Forgácsolási erőmérés kiértékelési módszerek

Az erőmérőből származó több csatornás adatok kiterjesztése .tdms volt, amely fájlokat a Matlab [36] szoftverbe épített modullal tudtam kiolvasni, és kezelni. A kezelő program az erőmérőcella kézikönyve alapján számolj ki a különböző komponenseket, a különböző csatornákról, így a megjelenített diagrammokon erő dimenzió lesz olvasható. A jelek szűrésére Butter-worth féle aluláteresztő szűrőt alkalmaztam, amely szűrés kulcsa a megfelelő határfrekvencia meghatározása. Ezen határfrekvencia meghatározásához a jelet Fourier transzformáció segítségével átalakítottam frekvencia tartományba, ahol láthatóvá váltak a magas frekvenciás fennharmónikus összetevők is. Minden beállításnál ugyanazt a határfrekvenciát választottam, mivel a főorsó fordulatszáma állandó paraméter volt. A Butter-worth féle szűrés nagy előnye, hogy nem minden határfrekvencia feletti fennharmónikust szűr ki, hanem utána bizonyos meredekséggel szűri ki ezen frekvencia összetevőket. A jelek frekvenciaszűrését és a Fourier transzformáltjait illusztrálja a 3-5. ábra.



3-5. ábra Butter-worth féle aluláteresztő szűrő használata az 1-es munkadarab X irányú erőadatain a, Szüretlen erőadatok b, Szüretlen erőadat Fourier transzformáltja c, Szűrt erőadat d, Szűrt erőadat Fourier transzformáltja

Az erőmérés eredményei a Matlab [36] szoftver és az oszlopdiagrammokat Pythonhoz telepíthető Matplotlib [37] könyvtár segítségével jelenítettem meg, mivel egy mérés során 4 beállításon mért folyamatosan az erőmérő cella, ezért 4 erőmérési eredmény tartozik egy adatsorhoz. Ahhoz, hogy különbséget lehessen tenni a beállításokon mért erők között meg kell keresni, azt a 0,5 másodperc hosszú várakozást, ahol a szerszám előtolás 0 volt, ezeket a szakaszokat mutatja a 3-7. ábra. A két fogásszámú beállítások esetén a második fogás forgácsolása során vettem a mintákat. Az erők átlagolása jelen esetben nem vezet hasznos értékhez, mivel a forgácsoló élek nem minden esetben forgácsoltak a megmunkálás során, emiatt látható a 3-6. ábrán, hogy a jel felugrik, majd visszaesik megközelítve a nullértéket. Az erők maximumának meghatározása előtt vettem a három komponens vektoriális összegét, majd kigyűjtöttem a legnagyobb eredő erőket, és ezeket átlagoltam az adott beállításon. Az összeadás során az erők nagyságát határoztam meg.

$$F_e = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

F_e : eredő erő N

F_x : X irányú erőkomponens N

F_y : Y irányú erőkomponens N

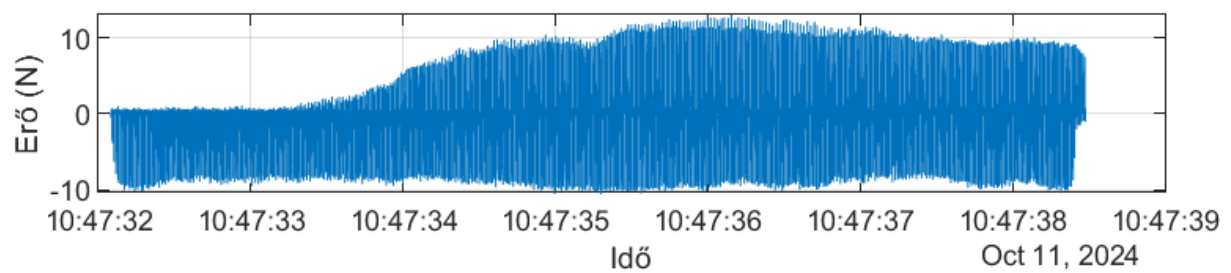
F_z : Z irányú erőkomponens N

$$F_{E\ max,avg} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{E\ n,max}}{n}$$

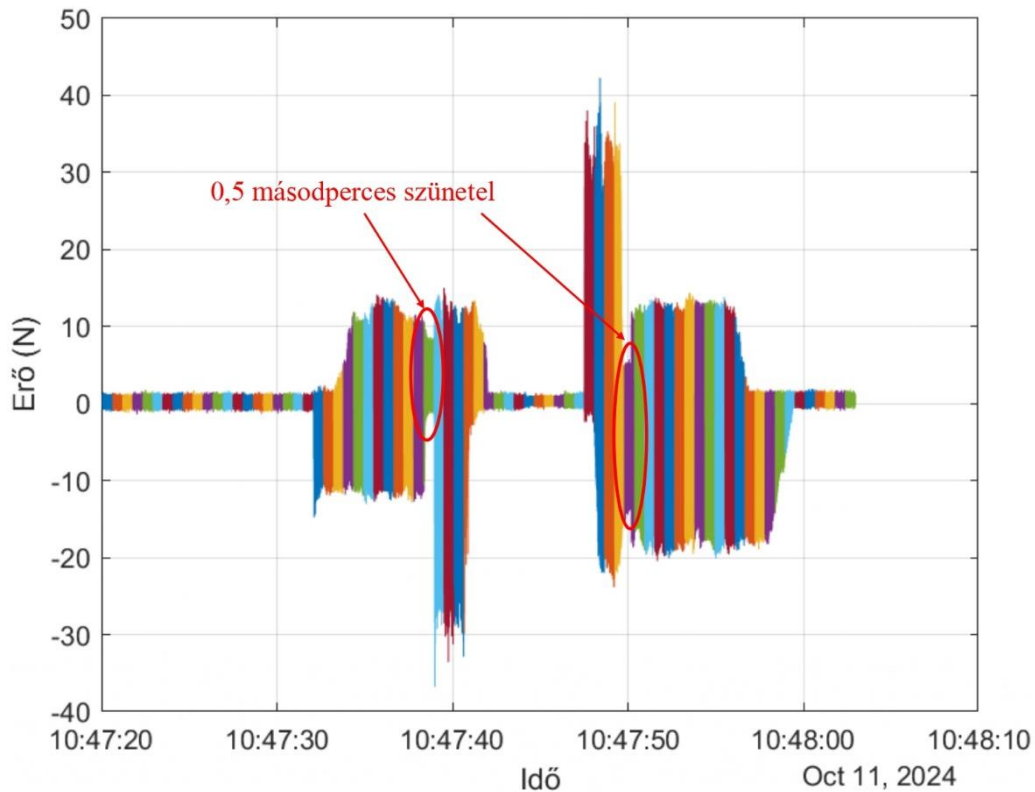
$F_{E\ max,avg}$: n legnagyobb eredő erő átlaga N

n : legnagyobb eredő erők darabszáma -

$F_{E\ n,max}$: n . legnagyobb eredő erő N



3-6. ábra 1. beállítás X irányú erőadata



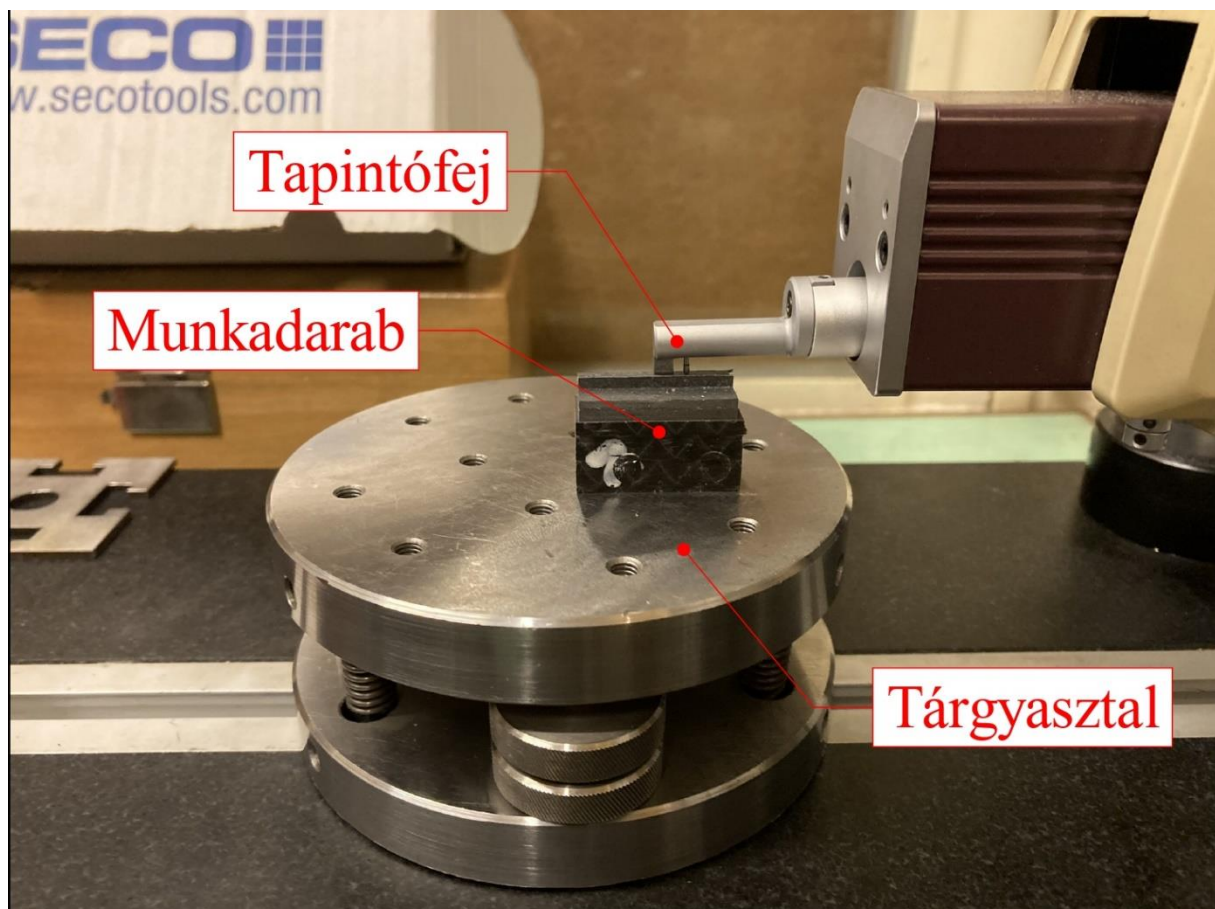
3-7. ábra 1-es munkadarab X irányú erőadata

3.4.2 Felületi érdesség adatok kiértékelési módszerei

A felületi érdességet egy Mitutoyo SJ-400 surftest felület érdesség mérő műszerrel végeztem el. Mivel a munkadarabokat egymással hasonlítom össze, emiatt nem használtam szabványos méréseket, hanem olyan paramétereket állítottam be a műszeren, amelyek minden beállítás esetén megfelelő pontosságú eredményeket adott vissza. Egy beállítás esetén 5 mérést végeztem, ahol egy mérés során a gép 3 mm-en húzta végig a tapintófejét. A méréseket a munkadarabon úgy helyeztem el, hogy kerültem a teljes munkadarab közepén lévő 12 mm-t (szerszám átmérő), mivel itt az erőmérés követhetősége miatt 0,5 másodpercet állt a szerszám, és közben jobban elsimította a felületet, ezt a problémát mutatja a 3-8 .ábra is. A kapott adatokat először Excel segítségével dolgoztam fel, majd a Pythonhoz telepíthető Matplotlib [37] függvényrajzoló könyvtár segítségével jelenítettem meg. A 3-9. ábrán látható a mérési elrendezés.



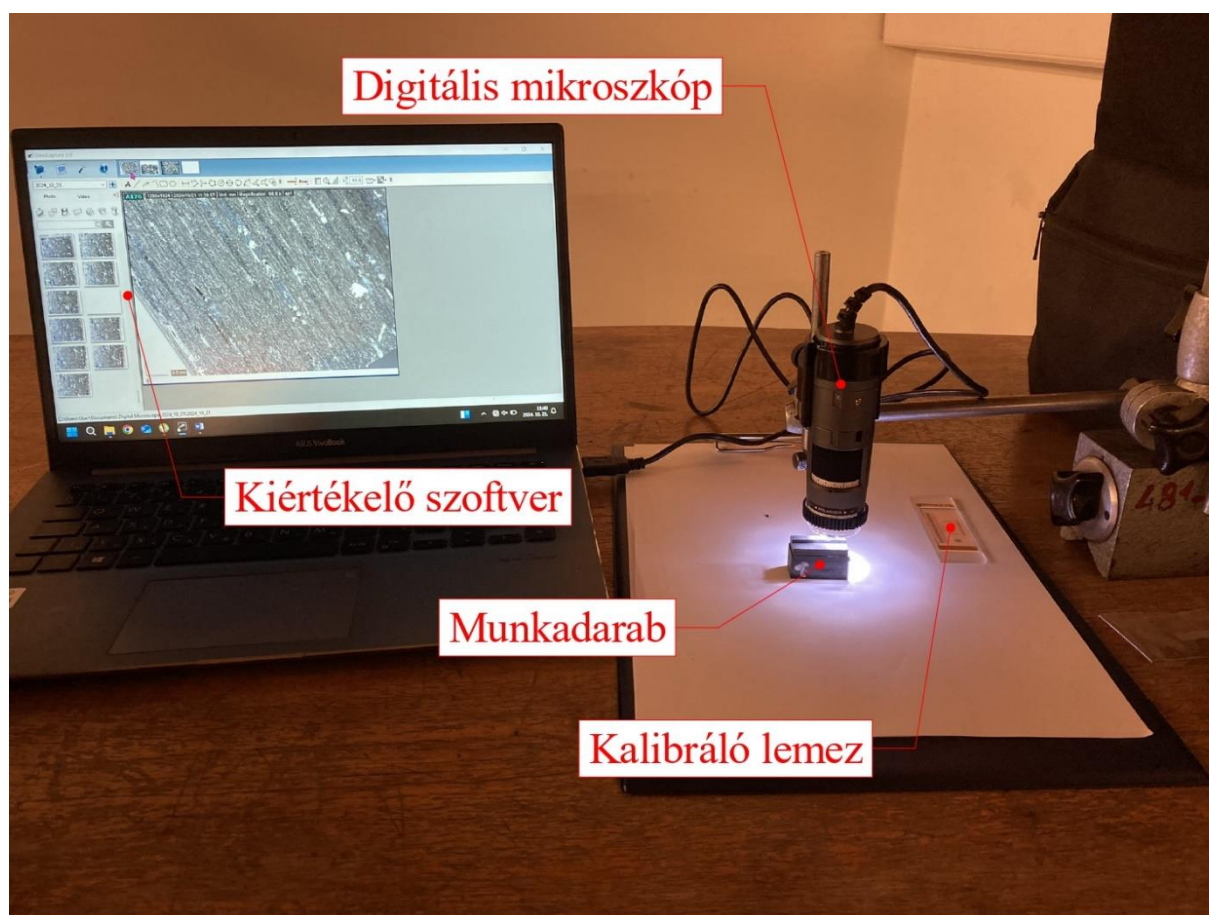
3-8. ábra 26. beállítás digitális mikroszkóppal készült fényképe



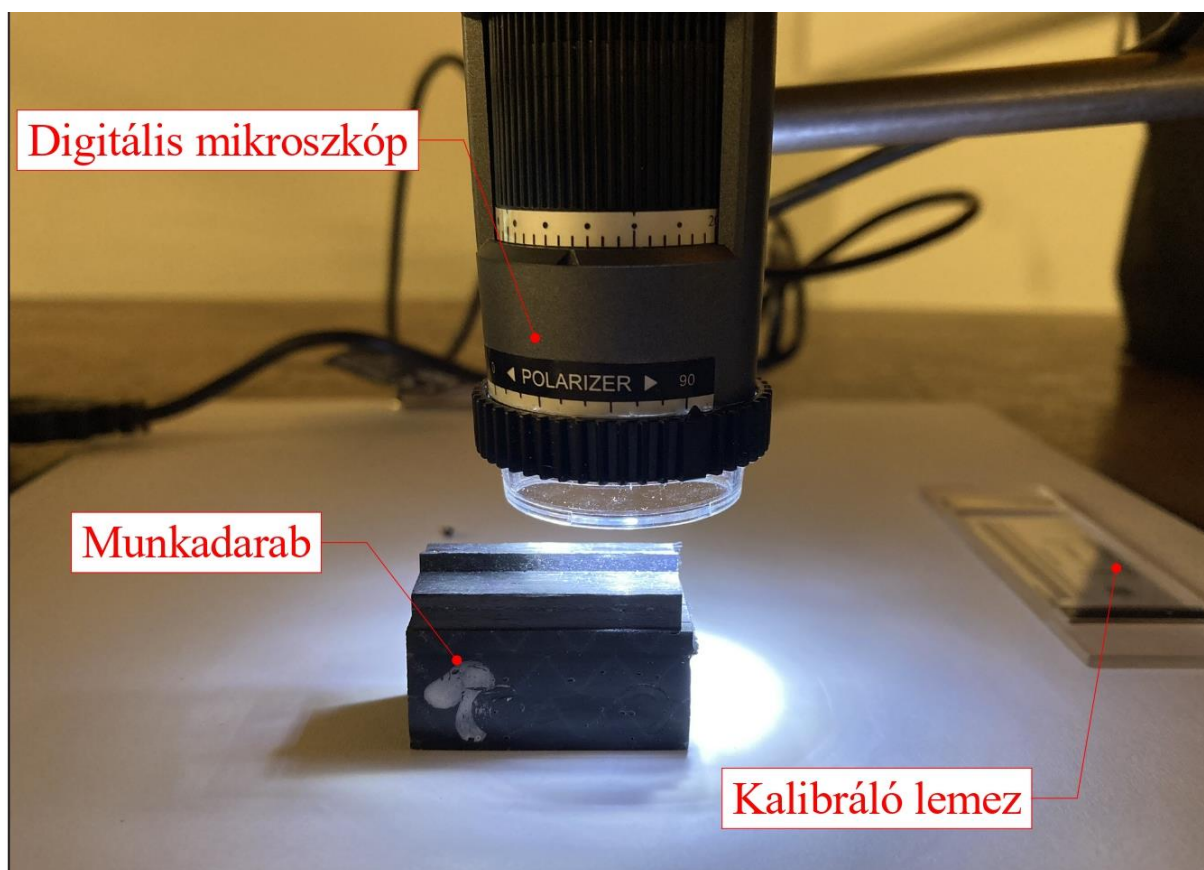
3-9. ábra Felülettapintó mérés összeállítása

3.4.3 Mikroszkóppal készített fotók módszerei

A felületeket a felületmérés után végig fotóztam egy Dina-Lite Edge Digital Microscope AF4515ZT típusú digitális mikroszkóppal. A fotók készítéséhez a mikroszkóphoz tartozó DinoCapture 2.0 szoftver használtam. A felületekről 3-4 fotót készítettem, amelyek majdnem egészen lefedik a beállítás teljes felületét. A mikroszkóppal készített felvételeken felületi hibákat és általános felületi jellemzőket kerestem az érdességmérés alapján. A használt szoftverben lehetséges a képeken méréseket végezni, ami előtt kalibrációt kell elvégezni, ezt a kalibrációt a mikroszkóphoz tartozó kalibráló lemezzel végeztem el, több magasságban (3-10. ábra jobb oldalán kivehető ez a kalibráló lemez). A mérési környezetet mutatja a 3-10. és 3-11 ábra.



3-10. ábra Digitális mikroszkóp mérési összeállítás

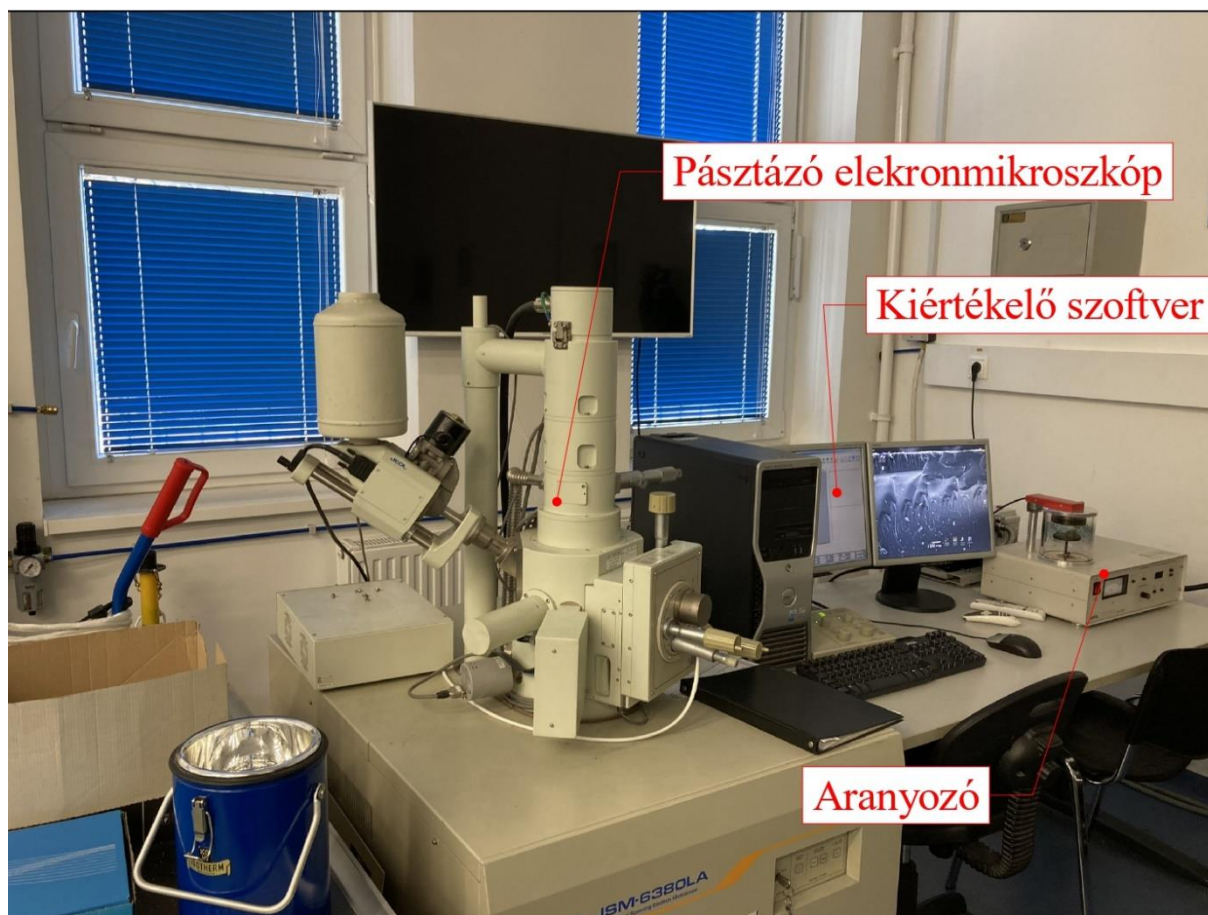


3-11. ábra Digitális mikroszkóp mérés munkadarab elhelyezkedés

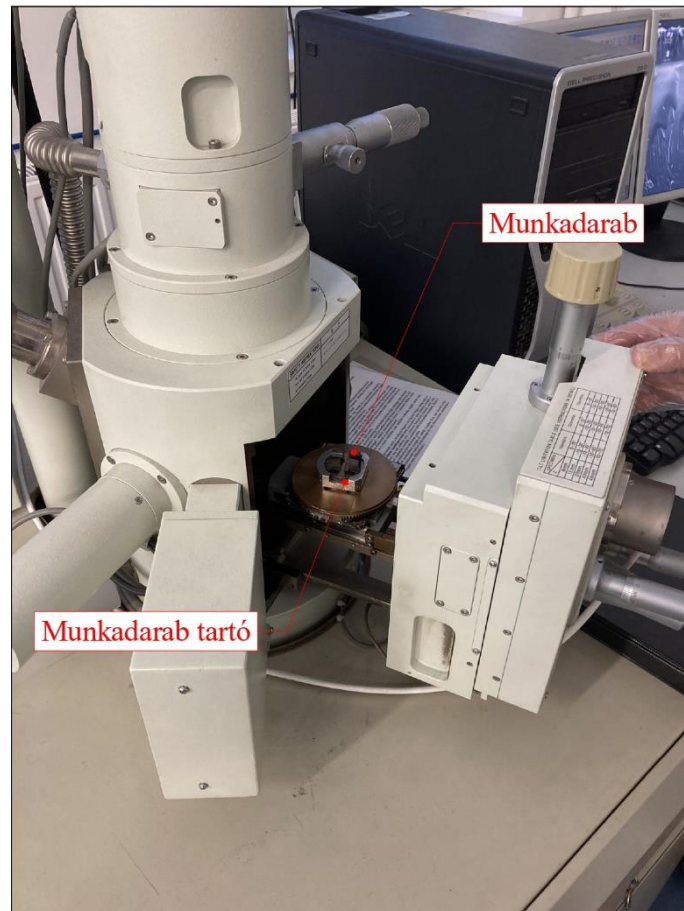
3.4.4 Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)

Az érdességmérés és a digitális mikroszkóppal készített fotók mellett volt lehetőségem nagyobb nagyítással megvizsgálni a munkadarabokat. Ezeket a vizsgálatokat a Polimertechnika Tanszék gondozásában lévő Jeol JSM-6380LA típusú Pásztázó elektronmikroszkóppal készítettem (továbbiakban SEM). A SEM-el készült felvételek segítségével jobban meg tudtam vizsgálni a felületek mikrogeometriáját, amellyel mélyebben bele láttam a síkmarás okozta mikro ronszolódásokba. A digitális mikroszkóp képei alapján határoltam be azokat a területeket, amelyeket érdekesnek találtam további átfogóbb vizsgálatokra. A mérés során 4 beállítást tudtam vizsgálni, és az előzetes eredmények alapján 4 különböző szálorientációs beállítást választottam, ahol az előtolás, a fogásmélység és a fogások száma is azonos volt. A kutatásom egyik célja a felületi minőség javítása, emiatt választottam a kisebb előtolás, és a kisebb fogásmélységgel síkmart beállításokat. Az utolsó faktor kiválasztásának szempontjai nem voltak ennyire egyértelműek, mivel a különbség nem volt annyira kimutatható az eddigi vizsgálataim során, de a csekély szakirodalommal bíró, és a kevésbé vizsgált két fogásos paramétert választottam.

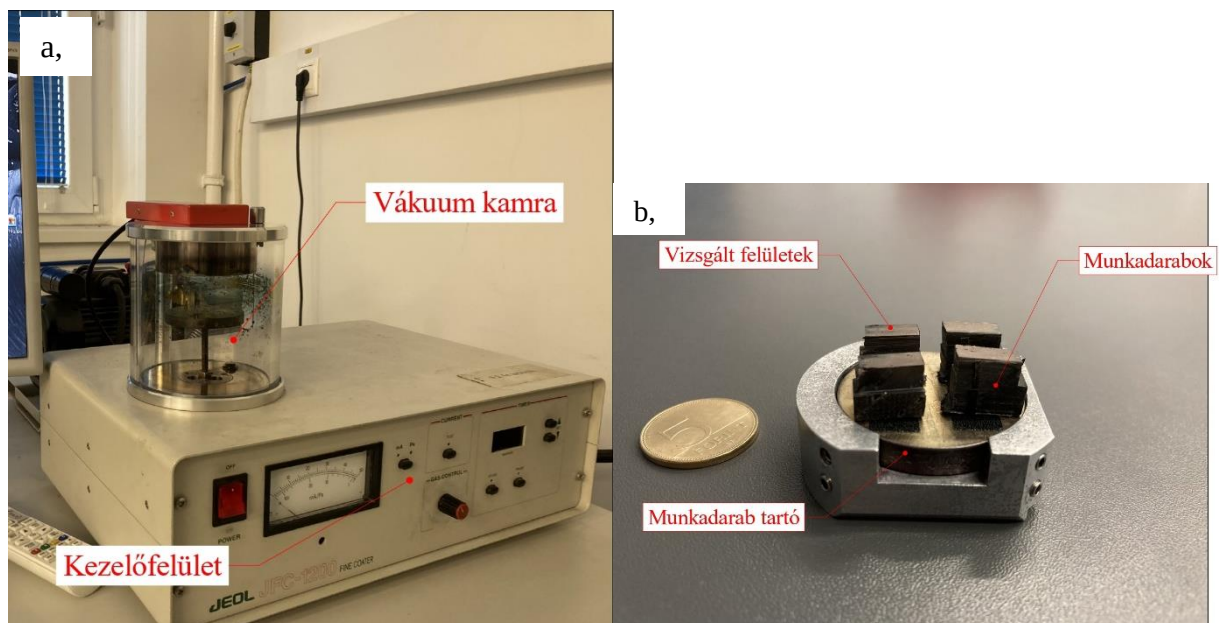
Az előkészítése során méretre vágtam a munkadarabokat, és mindegyik munkadarab esetén az első 10 mm-es szakaszt választottam a 3.4.2-es szakaszban ismertetett szerszám megállás miatt. A darabolást kézi fűrészsel végeztem el ahol 10x6x10 mm-es darabokat készítettem, amelyeket a 3-14 b, ábrán lehet látni. Az előkészületek ezután a megvizsgálni kívánt darabok tisztításával folytatódtak, amely a mellékletben található kézi ecset, és kézi levegőfúvó segítségével történt. Erre ezért volt szükség, mert a darabolás során a mátrixanyag és a szénszál finom porként került a darabokra, amely hátráltatta volna az aranyozással elért vezetőképességet. A darabok túl magasak voltak ahhoz, hogy teljesen le tudjuk aranyozni, emiatt mindegyik darab oldalára elektronikusan vezető szénszálakat tartalmazó ragasztót helyeztünk fel. A darabok szigetelő hatása miatt volt szükség ezen előkészületekre, mivel a SEM-ben zajt alkotnak a felületen felhalmozódó elektronok. Az aranyozást egy Jeol JFC-1200 FINE COATER eszközzel végeztem, a folyamat körülbelül 25 másodpercig tartott, az aranyozó eszközt a 3-14 a, ábra mutatja. A mérés során használt eszközöket és a kiértékelési elrendezést mutatja a 3-12. és 3-13. ábra.



3-12. ábra SEM mérés környezete



3-13. ábra A munkadarab SEM mérőeszközbe helyezése



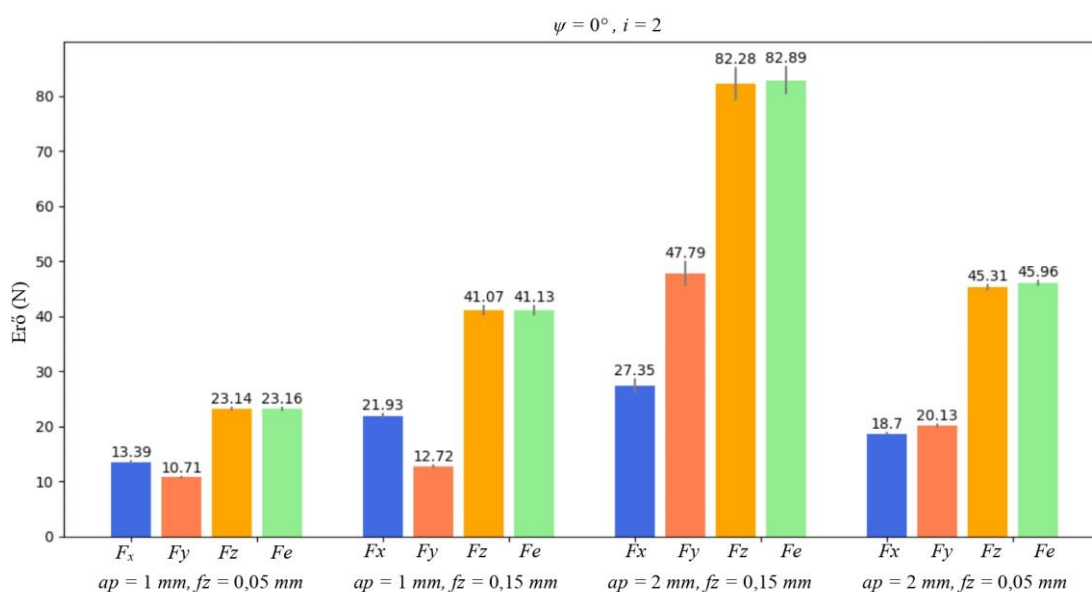
3-14. ábra SEM mérés környezete a, aranyozó műszer b, munkadarabok elhelyezkedése a SEM mérés közben

4 Eredmények ismertetése és értelmezése

Ebben a fejezetben ismertetem, és értelmezem a kísérlet során gyűjtött, majd módszeresen kiértékelt adatokat, képeket.

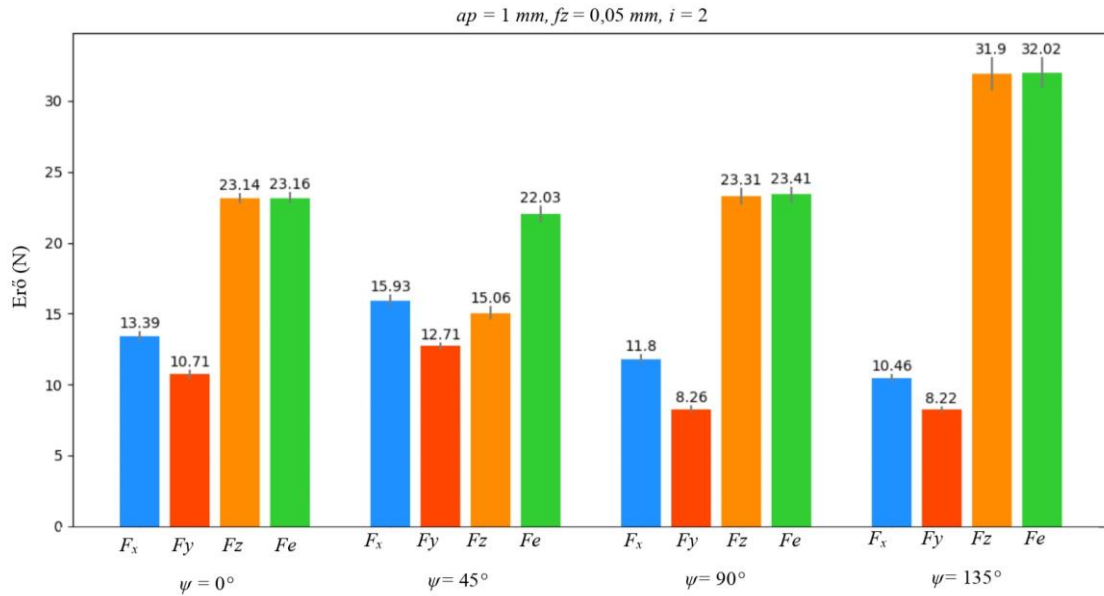
4.1 Forgácsolási erő

Az erőmérés során először megnéztem, hogy az erőkomponensek, hogyan alakulnak egymáshoz képest a forgácsolás során. A 4-1. ábra alapján látható, hogy a fogásmélység növelése az Y irányú komponensre nagyobb hatással volt, mint az X komponensre, de általánosan is kijelenthető, hogy a fogásmélység növelése a forgácsolási erő növekedését eredményezi. A 4-1. ábrán látható, hogy az előtolás növelésével emelkedik a forgácsolási erő, és ez a faktor van a legnagyobb hatással az erőre.



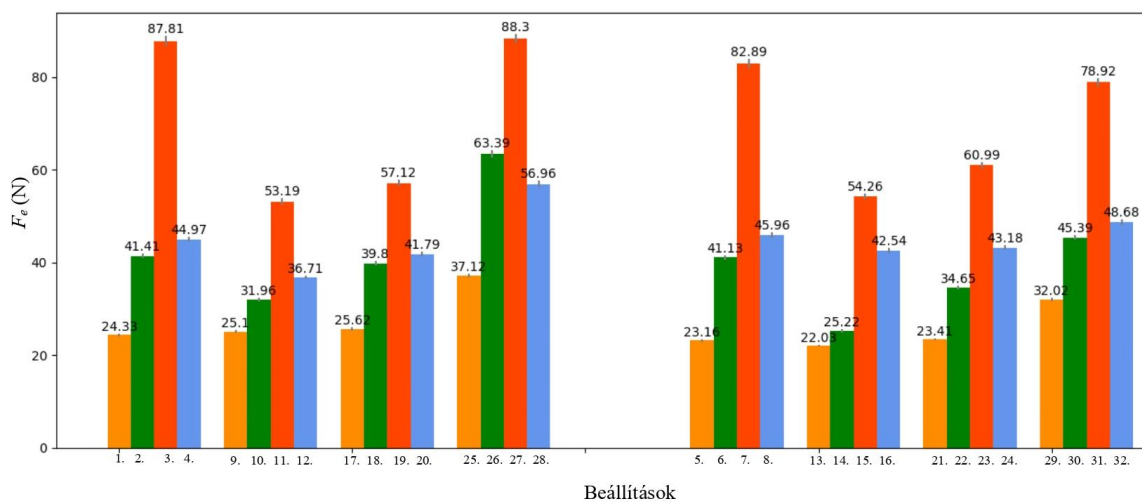
4-1. ábra 2-es munkadarab forgácsolási erő értékei X,Y,Z komponensekkel és eredő erő ábrázolásával

A szálorientációs szögeket figyelembe véve látható, hogy nem minden esetben volt a Z irányú erő a legnagyobb, ezt a kivételt erősíti a 4-2. ábra, ahol a 45°-os szálorientációhoz tartozó erőértékek esetén a többihez képest mindhárom erőkomponens hasonlóan nagy volt. Ezt a szálorientációval tudjuk megmagyarázni, hiszen ebben az esetben a szálakat lenyomtuk a forgácsolás során, és nem húztuk ki a mátrixból.



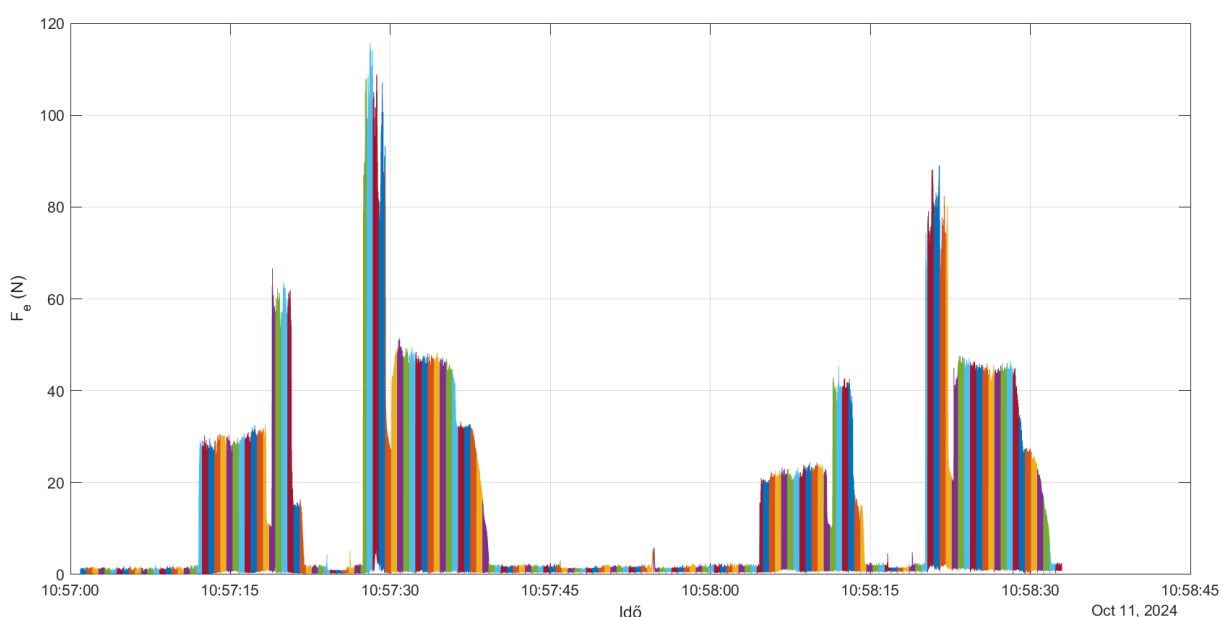
4-2. ábra X,Y,Z irányú erőkomponensek, és az eredő erő szálorientációnként

A 4-3. ábra alapján kiderül, hogy várható módon a forgácsolási erőre legkisebb hatással a fogások száma volt, mivel a fogások során a fogásmélység nem változott, emiatt ugyanakkora térfogatot munkáltunk ki az anyagból. Szintén az ábra alapján kijelenthető, hogy a legnagyobb hatással a fogásmélység, és az előtolás volt a forgácsolási erőre. A szálorientációs szög látványosan, csak a legkedvezőtlenebb esetben emelte ki az erőt. A legnagyobb erőket a 0° illetve a 135° fokos szálorientáció esetén kaptam, ami azzal magyarázható, hogy a 0° -os esetben a szálakat hosszirányba kellett vágni, míg a 135° esetén pedig a szálak jobban kihúzódtak a mátrix anyagból.



4-3. ábra Eredő forgácsolási erő beállításonként

Kitekintésképpen megfigyeltem, hogy az első fogás megmunkálása közben nagyobb erők ébredtek, mint a második fogásnál. Ennek a hátterében az állhat, hogy az első fogás során a szálakat jobban kihúztuk a megmunkálás közben, és a második fogásban ezeket a kihúzott szálakat már kevesebb erővel tudtuk elvágni. A 4-4. ábra alapján látszik, hogy ez az erőkülönbség nem konstans, mivel a második fogás során is voltak olyan szálak, amelyek ugyanolyan módon voltak a munkadarabokban, mint az első fogás esetén. Ezen az ábrán ugyanazon munkadarabon vett két fogást néztem, míg az előzőekben mindig az utolsó fogás közben ébredő erőket vizsgáltam. Ezen megfigyelésemet Li és mtsai [26] is bebizonyították egy ortogonális forgácsolási kísérlettel, és abban a kutatásban is csekély eltéréseket találtak az erőértékek között.



4-4. ábra 2-es munkadarab estén az 1 illetve 2 fogás összehasonlítása

A megállapításomat alátámasztásáról olvashatnak a mellékletben található ANOVA vizsgálatban.

4.2 Felületi minőség

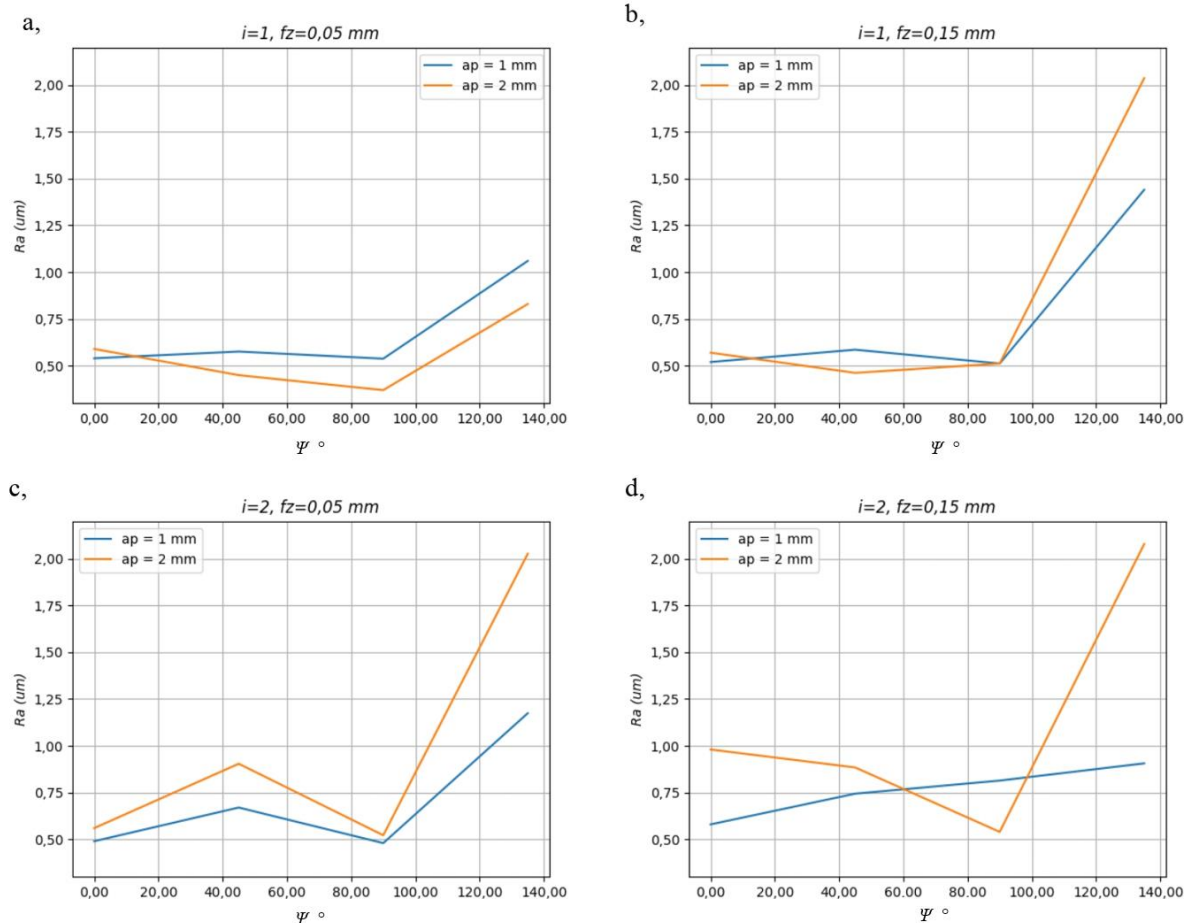
A felületi minőséget három módszerrel vizsgáltam. Az első módszer során egy kontakt profilométerrel szerzett adatokkal tudom alátámasztani a megállapításaim. A második és harmadik módszer során egy digitális mikroszkóppal és egy pásztázó elektronmikroszkóppal készített fotók alapján vizuálisan tudom bemutatni a felület integritását. A következő szakaszokban ezen megfigyeléseimet és megállapításaimat fogom részletesen kifejteni. A felület érdesség mérésre a CFRP anyagok esetén nem ad pontos képet a jelenleg használt mérőszámok, így a kapott eredményeket nem érdemes csupán önmagukban tekinteni.

4.2.1 Felületi érdesség

A 4-5. ábráról leolvasható, hogy a szálorientációs szög hatása a legnagyobb a felületi érdességre, amelynek akkora hatása van, hogy a maradék 3 faktorról nem lehet ellensúlyozni. A kísérleteim során azt a megfigyelést tettem, hogy a fogásmélységnek ezen a tartományon minimális a hatása. A fogások számának is minimális hatása van, de megállapítható, hogy általában a második fogás során jobb felületi érdesség mutatókat tudtam elérni. A legjobb értékeket a 0° és a 90° szálorientáció esetében tudtam elérni, de nem minden esetben egyértelmű, hogy melyik az optimálisabb. Kijelenthető viszont, hogy a legrosszabb eredményeket a 135° szálorientáció esetén lehetett mérni. A 45° orientáció esetében változó értékek jöttek ki, de egyik beállítás esetén sem volt a legjobb, sem a legrosszabb. A teljes mérési eredményekről a 4-1. táblázatban lehet olvasni.

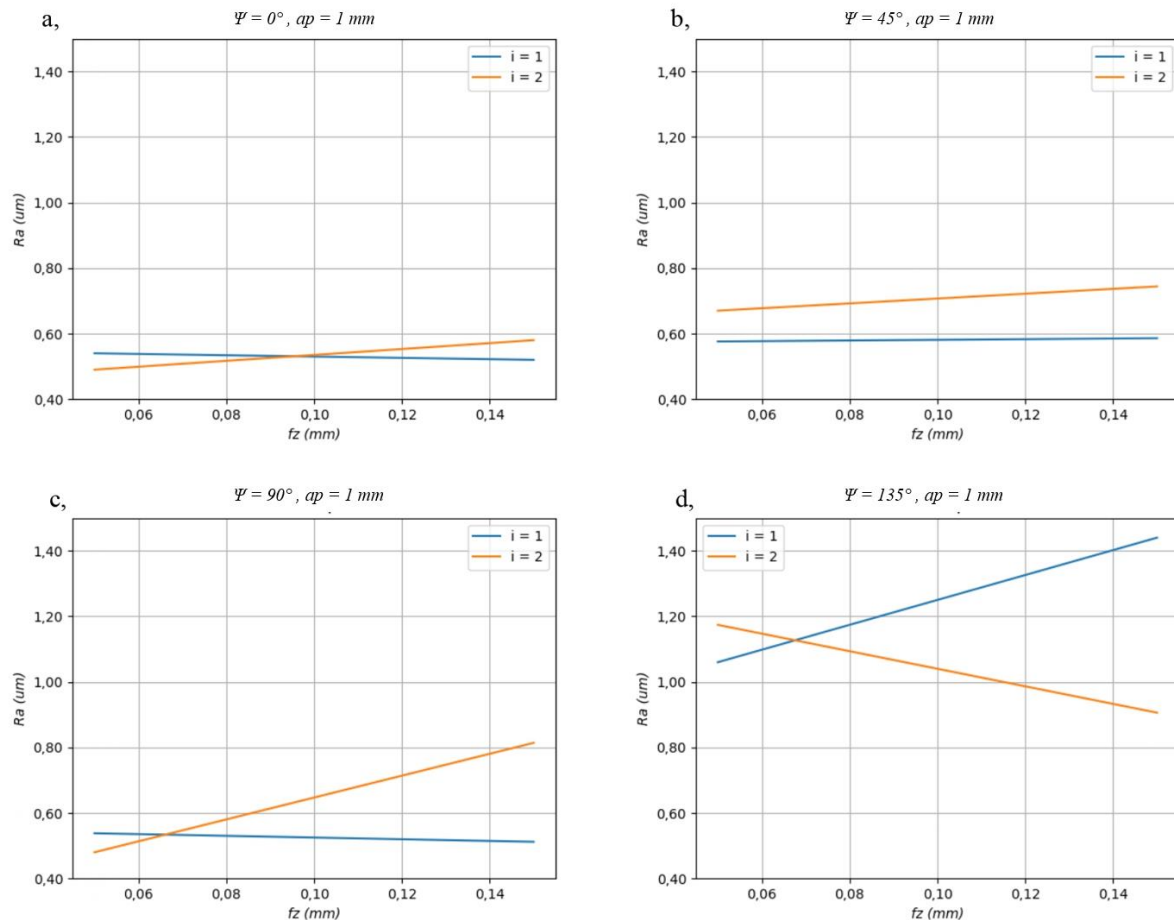
4-1. táblázat Felületi érdességek

Ssz.	Ra	Rz	Rq	Rz/Ra	Ssz.	Ra	Rz	Rq	Rz/Ra
-	μm	μm	μm	-	-	μm	μm	μm	-
1	0,54	5,54	0,74	10,22	17	0,54	11,5	1,02	21,38
2	0,52	6,74	0,75	12,96	18	0,51	9,58	0,93	18,71
3	0,57	5,98	0,77	10,45	19	0,51	8,92	0,85	17,42
4	0,59	5,20	0,76	8,87	20	0,37	7,40	0,66	20,00
5	0,49	5,04	0,68	10,20	21	0,48	8,72	0,77	18,17
6	0,58	6,34	0,77	11,01	22	0,81	13,26	1,49	16,29
7	0,98	12,00	1,52	12,27	23	0,54	8,60	0,81	15,93
8	0,56	6,12	0,78	10,85	24	0,52	8,90	0,86	17,5
9	0,58	10,02	1,02	17,40	25	1,06	21,76	2,2	20,53
10	0,59	13,5	1,05	23,07	26	1,44	27,06	2,67	18,79
11	2,04	21,84	2,84	10,73	27	0,46	11,02	0,86	23,85
12	0,83	14,5	1,44	17,47	28	0,45	9,36	0,84	20,80
13	0,67	15,68	1,47	23,40	29	1,17	19,6	2,37	16,70
14	0,74	16,38	1,386	22,02	30	0,91	14,88	1,51	16,42
15	2,08	31,84	3,69	15,32	31	0,88	19,18	1,70	21,70
16	2,03	25,84	3,15	12,75	32	0,90	21,30	2,01	23,56



4-5. ábra Ra érték változása különböző szálorientációs szög függvényében

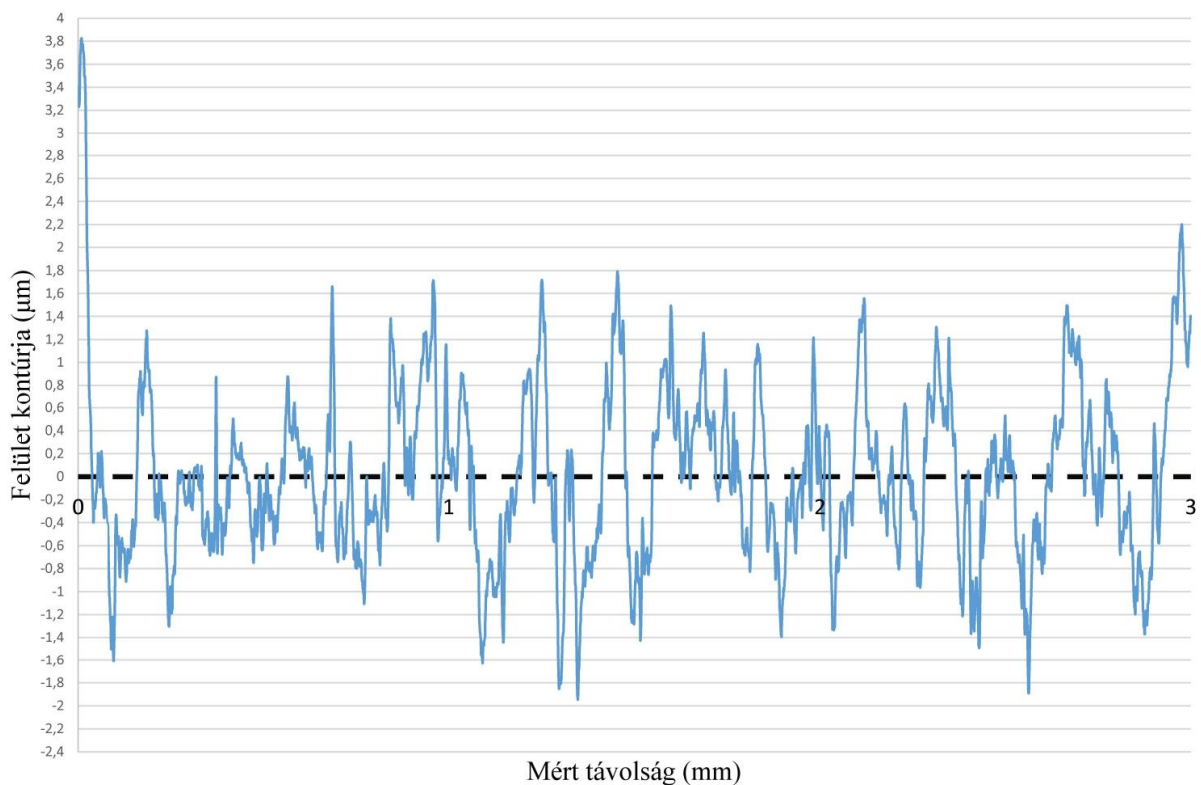
A 4-6. ábrán jól kivehető az előtolás hatása, amely szintén nem volt akkora hatással a felületi érdességre, mint a szálorientációnak, de ennek a részletesebb kitárgyalását a 4.2.2-es szakaszban fogom megejteni.



4-6. ábra Ra érték változása az előtolás változtatása esetén

Összefoglalva azt a kijelentést tudom megfogalmazni, hogy a felületi érdesség szempontjából a legfőbb hatás a szálorientáció, amelyet az ANOVA számítások is alátámasztottak. A többi faktor hatását a 4.2.2-es szakaszban fogom részletesen kifejteni.

Kitekintésképpen létrehoztam az Rz/Ra arányt, amely fizikai háttere annyit jelent, hogy a legnagyobb csúcsok közötti távolságot hasonlítja össze az általános érdességet egy mérőszámba. A gyakorlatban ez a mérőszám arra szolgál, hogy fel tudjuk írni azt, hogy mekkora a kráterek és kiugrások eltérése az átlagos felülethez képest. A mérésem során az Rz/Ra értéke 10-20 körül mozog, ami azt jelenti, hogy a felületen sok kráter található, amelyet a mikroszkóppal készített felvételek alá tudnak támasztani. A 4-7. ábra mutatja az 1-es beállításon mért egyik felületi érdességet, amelyen látszik, hogy az inhomogén szerkezet miatt több kráter is található.



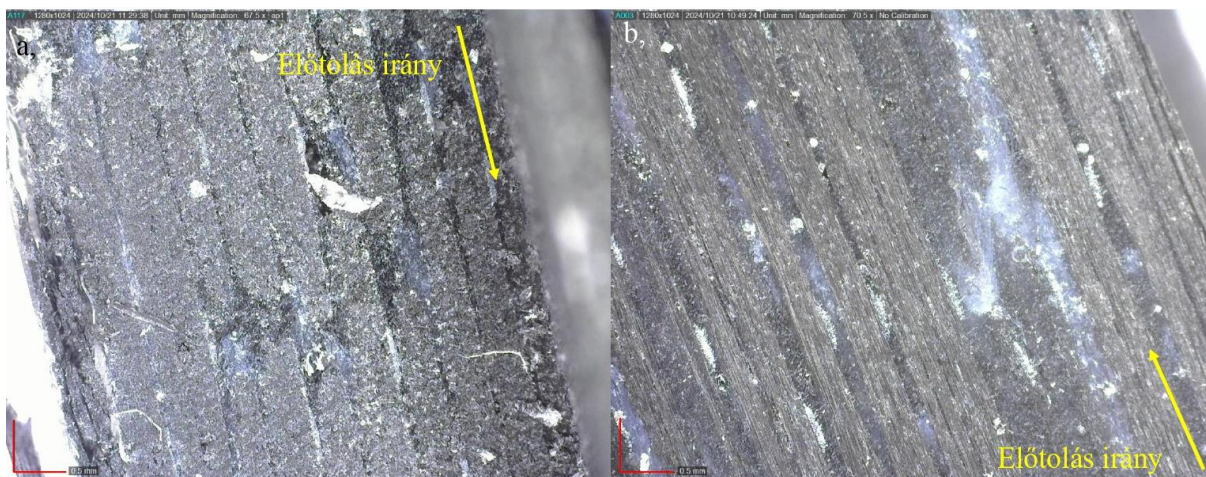
4-7. ábra Felület kontúrja az 1-es beállítás esetén

4.2.2 Felületi integritás

A képeket elemezve láthatóvá vált, hogy miért kaptam a felület érdességekre ilyen szálorientációtól függő értékeket. A síkmarás során a szálak elvágása után a mátrixanyag valószínűleg valamilyen mértékben degradálódott, és ezt a gumi szerűen megolvadt mátrix anyagot kente fel a szerszám a felületre, így kialakítva egy simább felületet. A síkmarás velejáró hatása, hogy az anyag nagyobb felületen találkozik a szerszámmal a tényleges forgácsolás után, mint például egy kontúrmarás esetén.

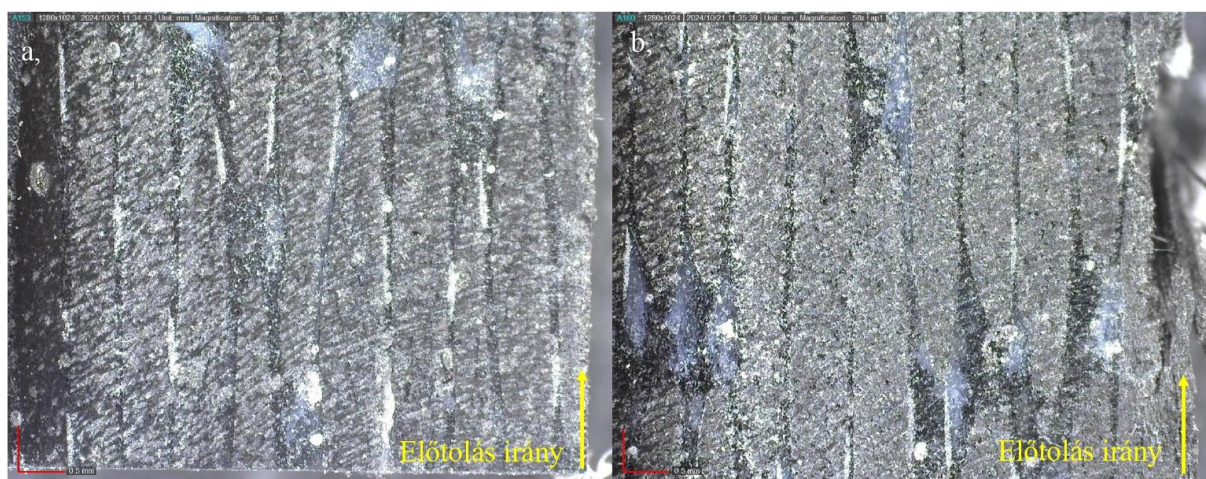
A kenés során nem számított a fogásmélység, sem a fogások száma a kísérletek során választott paraméterek esetén. A szálak iránya viszont nagyban befolyásolta a kenést, mivel a hátramaradt szálak, amelyek a 135° orientáció esetén volt a legtöbb, akadályozták a mátrix kenését, ezzel egyenetlenebb felületet hátrahagyva a szerszám elhaladása után.

A 4-8. ábrán megfigyelhető a szálorientáció hatása az anyagon. Az 4-8. a, ábrán látható az érdességi adatok alapján a legrosszabb, és a b, ábrán pedig az egyik legjobb felület. Az a, ábrán látható, hogy a szerszám barázdákat hagyott a munkadarabon, mivel ebben az esetben a mikro geometriai hibák miatt nem tudta egységesen elkenni a mátrixanyagot. A b, ábrán a szálak iránya miatt kevesebb mikro geometriai hiba keletkezett, emiatt egységesebb, simább felületet tudott maga után hagyni a szerszám.



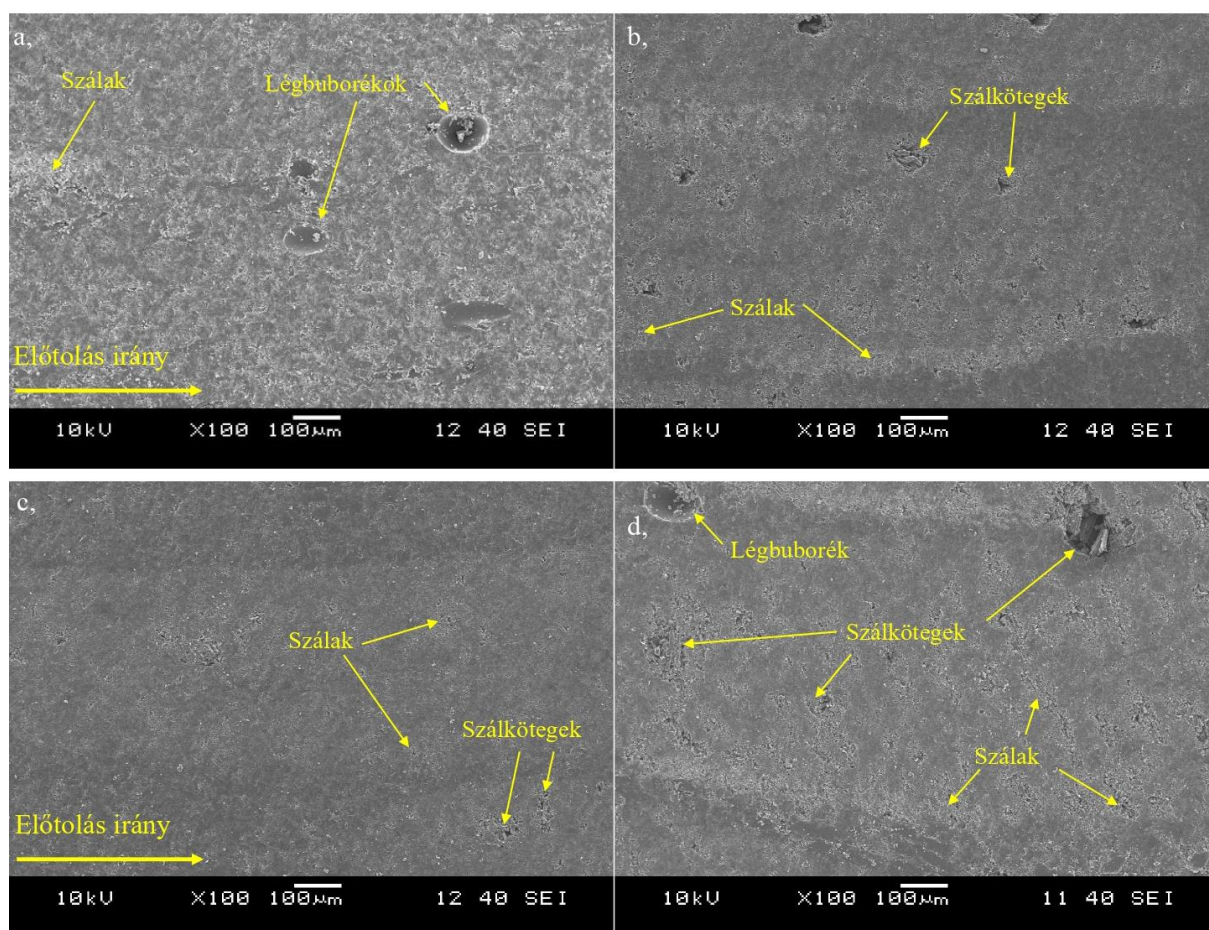
4-8. ábra Digitális mikroszkóppal készített fotók a, 15-ös beállítás esetén b, 1-es beállítás esetén

A 4-9. ábrán megfigyelhető az előtolás hatása a munkadarabon, ahol a nagyobb előtolás esetén a barázdák távolsága nagyobb, így egy kevésbé egyenletesebb felületet kaptunk, amelyet az érdességmérési adatok is alátámasztanak. A további szálorientációk esetén ez nem látható a szakasz elején említett mátrixanyag elkenése miatt. Ezen megfigyelések alapján kijelenthető, hogy a felületi érdesség csökkenthető az előtolás csökkentésével, de közel sem olyan mértékben, mint a szálorientáció változtatásával, de ez a csökkenés nagymértékben, csak a szélsőségesen rossz esetekben kimutatható.

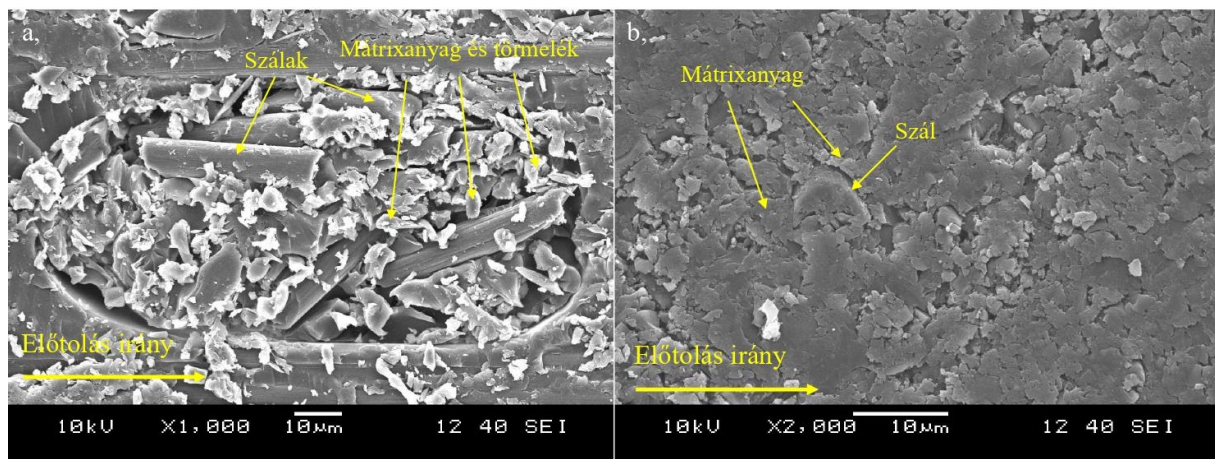


4-9. ábra Digitális mikroszkóppal készített fotók a, 19-es beállítás esetén b, 30-as beállítás esetén

A mikro geometria részletesebb kiértékelése miatt vizsgáltam meg négy beállítást a pásztázó elektronmikroszkóppal. Az így készített képek alátámasztják a mátrix anyag elkenését a munkadarab felületén. A 4-10. ábrán általános felületekről készítettünk fotókat. Már ezen a nagyításon is látható, hogy a 0° illetve a 90° szálirány esetén homogénebb a felület, viszont ezen felületeken is felfedezhető mikro geometriai hibák. A 4-10 a, ábrán látható légbuborékok, nem a forgácsolás során kerültek az anyagban, hanem a CFRP gyártása során alakultak ki. A 4-11. a, ábrán látható, hogy egy légbuborékba hordta bele a szerszám a mátrixanyagot, az elvágott szálakat, és egyéb törmelégeket, a 4-11. b, ábrán pedig látható egy elvágott és be nem kent szál, amelyből sokkal többet kellene látni a képeken, de a mátrix anyag kenése olyan nagymértékben játszott szerepet, hogy csak néhány ilyen szálát láthatunk.

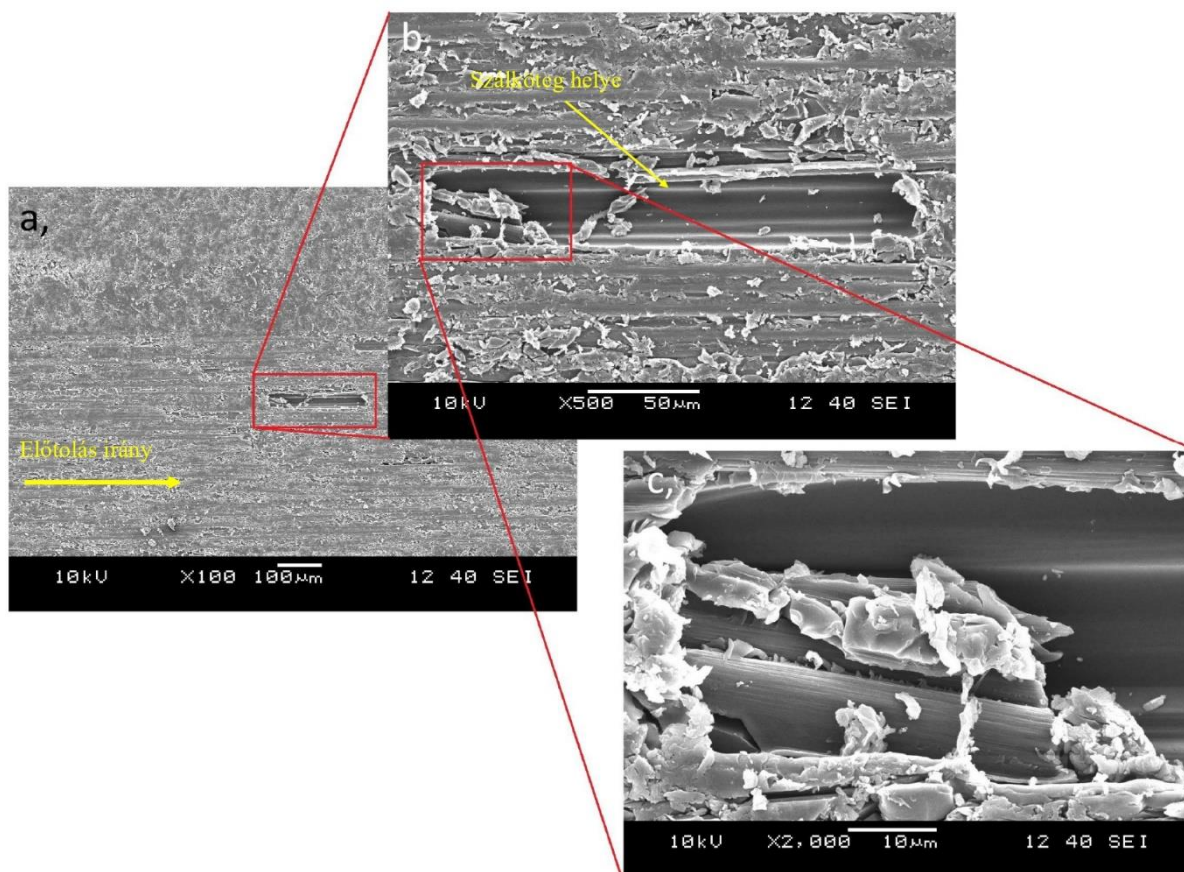


4-10. ábra Általános felület pásztázó elektronmikroszkóppal készült képei a, 5-ös beállítás b, 13-as beállítás c, 21-es beállítás d, 29-es beállítás

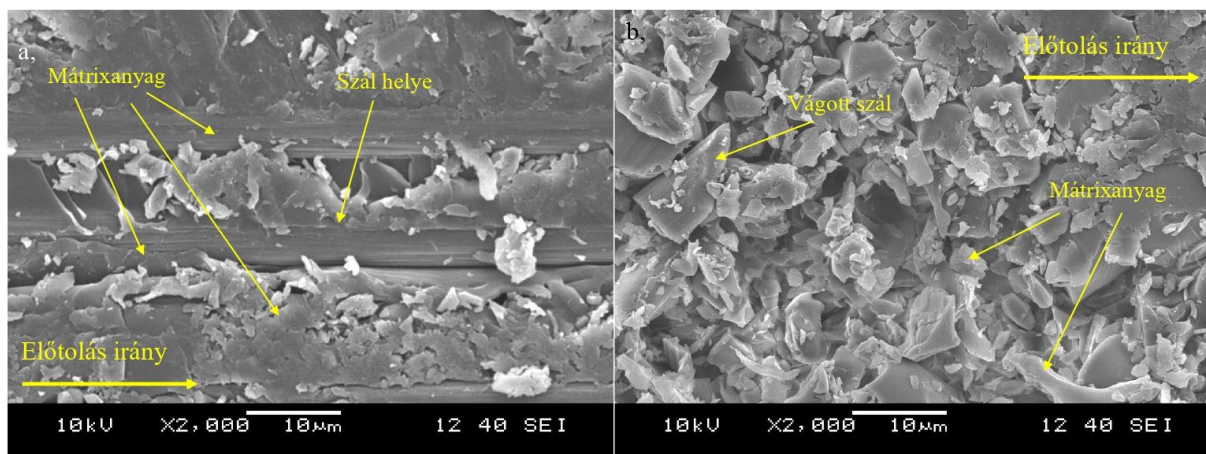


4-11. ábra Mártix kenés hatásai pásztázó elektronmikroszkóppal készített képeken a, vágott szálak, mártixanyag, és törmelék felgyülemleése egy légbuborékban az 5-ös beállítás esetén b, mártixanyag és szál a 21-es beállítás esetén

A forgácsolás során előfordult, hogy egész szálkötegeket húztunk ki az anyagból, amely kiválása során roncsolta a környezetét, ezzel felületi hibát hagyva maga után. Egy ilyen szálköteghúzódnást mutat be a 4-12. ábra, ahol látszik, hogy a szálköteg szálirányba roncsolt a leginkább. A 4-12. ábrán látható munkadarab szálorientációja 0° , szóval valószínű ez a szálköteghúzás a miatt mehetett végbe, hogy nem pontosan 0° állt a szálköteg, és a kiálló részbe kapott bele a szerszám, és a mátrix anyag nem tudta magában tartani a köteget. A folyamat végén a szálakat elvágta a következő forgácsoló él, ami jól látszik a c, ábrán. A 4-13. a, ábrán látható, hogy a szálakat hosszanti irányba nem tudtuk elvágni, hanem az egész szál kikerült az anyagból, ezen kívül az ábrán jól látszik, hogy a mátrixanyagot kentük a felületen, de ebben az esetben nem fedte el teljesen a szál helyét a mátrix anyag. A 4-13. b, ábrán, pedig kivehető, hogy nem csak a mátrixanyagot, hanem a már levágott szálakat is rákentük a felületre.

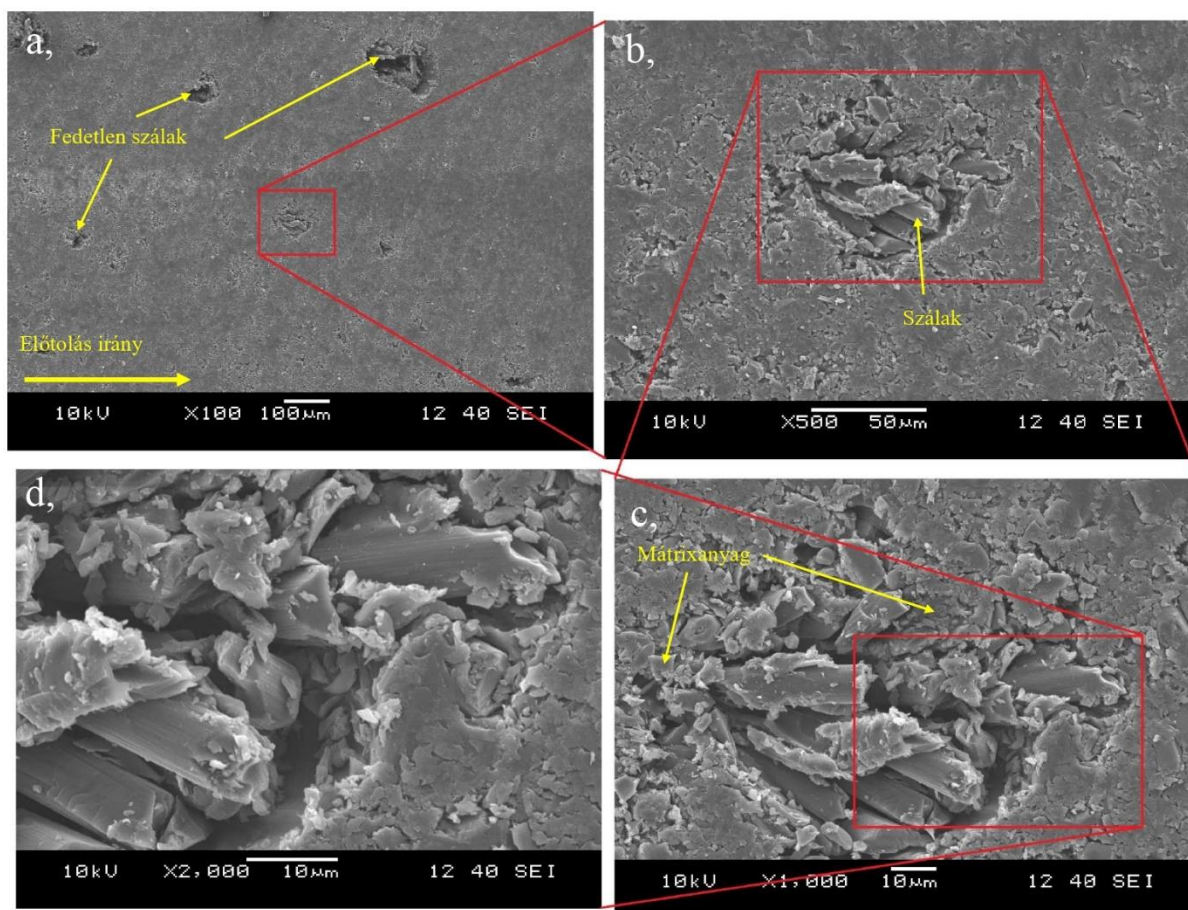


4-12. ábra Szál kiválás pásztázó elektronmikroszkóppal készített képen az 5-ös beállítás esetén a, 100-szoros nagyításban b, 500-szoros nagyításban c, 2000-szeres nagyításban



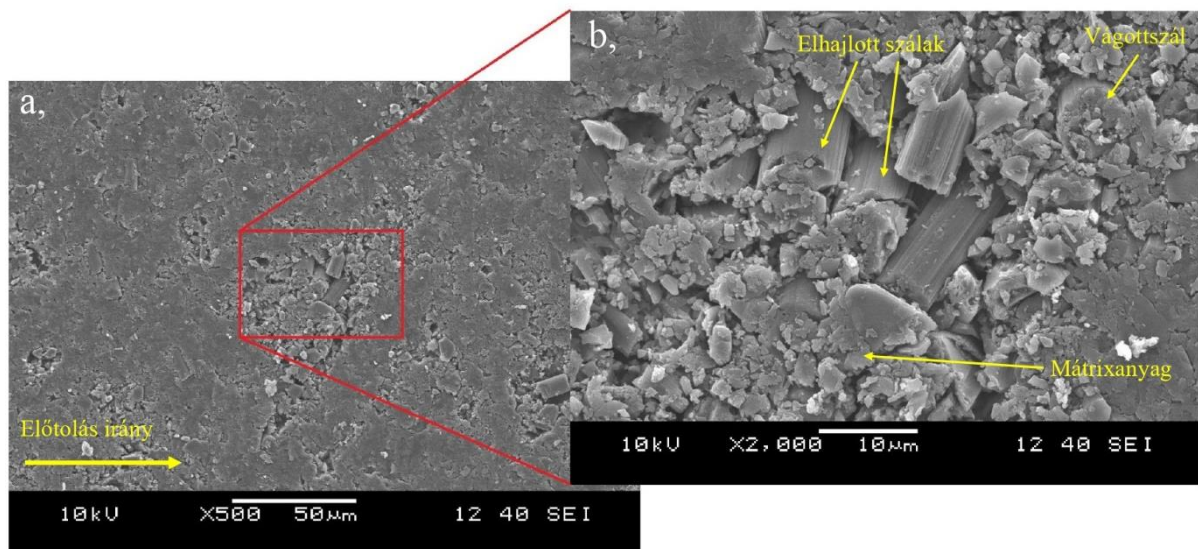
4-13. ábra Mikrogeometriai hibák pásztázó elektronmikroszkóppal készült képen az 5-ös beállítás esetén a, szálhiány a mátrixanyagban b, mátrixanyag és vágott szálak elkenődése a felületen

A készített fotókon a felület nagy részén mátrixanyagot látunk, és kevés vágott szálát, ami a már említett kenés miatt alakult ki. A 4-14. ábrán egy 45° szálorientáció esetén látható, hogy nem minden esetben fedte el teljesen a vágott szálakat a mátrixanyag, ezen kívül jól kivehető a szálak iránya és roncsolódása ezen az ábrán.



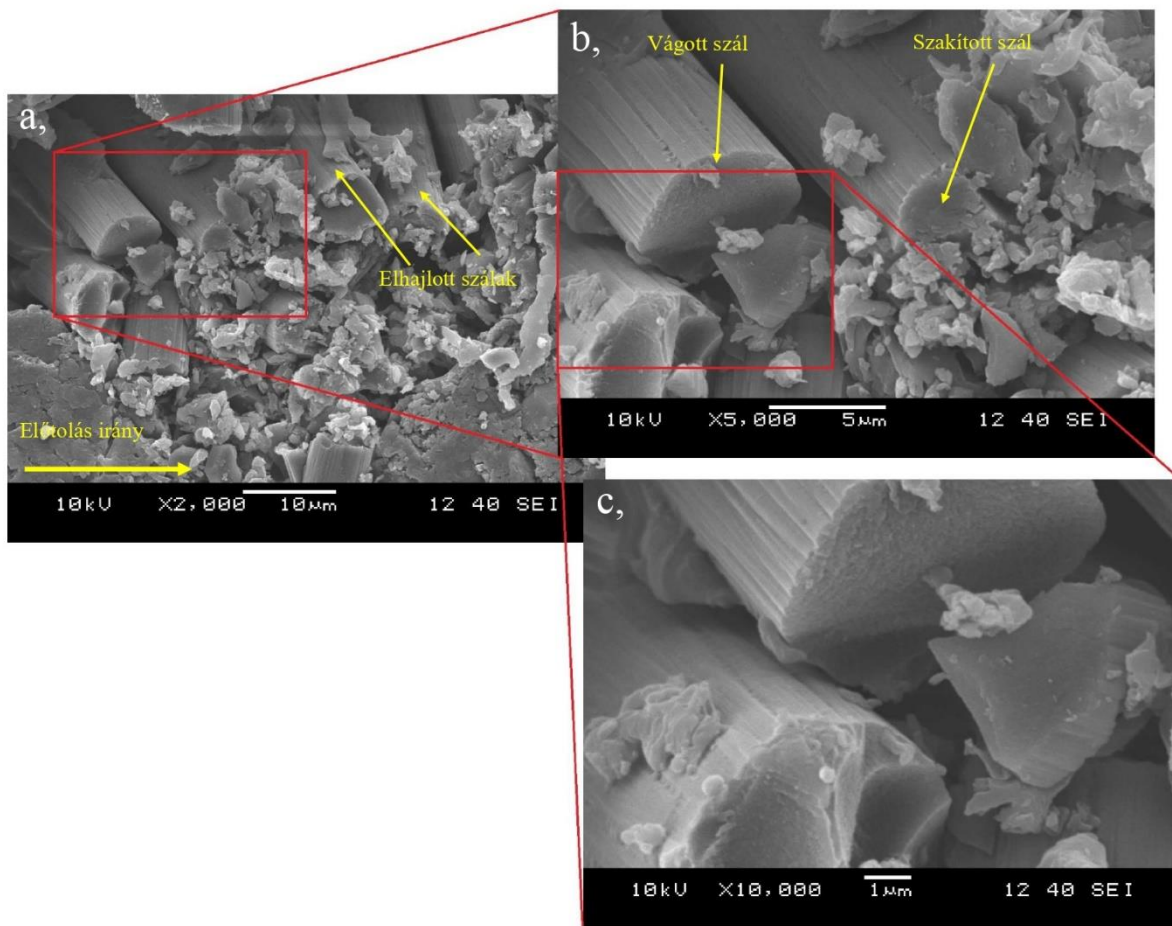
4-14. ábra Szálkötegek kiválás pásztázó elektronmikroszkóppal készített képen az 13-as beállítás esetén a, 100-szoros nagyításban b, 500-szoros nagyításban c, 1000-szeres nagyításban d, 2000-szeres nagyításban

Forgácsolás közben nem minden esetben sikerült jól elvágni a szálakat, amely a vágatlan szálak kihajlását eredményezte, de a síkmarás során ezeket a kihajlott szálakat belesimítottuk a felületbe és a legtöbb esetben elfedtük mátrixanyaggal. A 4-15. ábrán jól kivehető a szálak kihajlása, és a kihajlás okozta felületi hibák, és a mátrixanyag kiszámíthatatlan kenődési folyamata is.



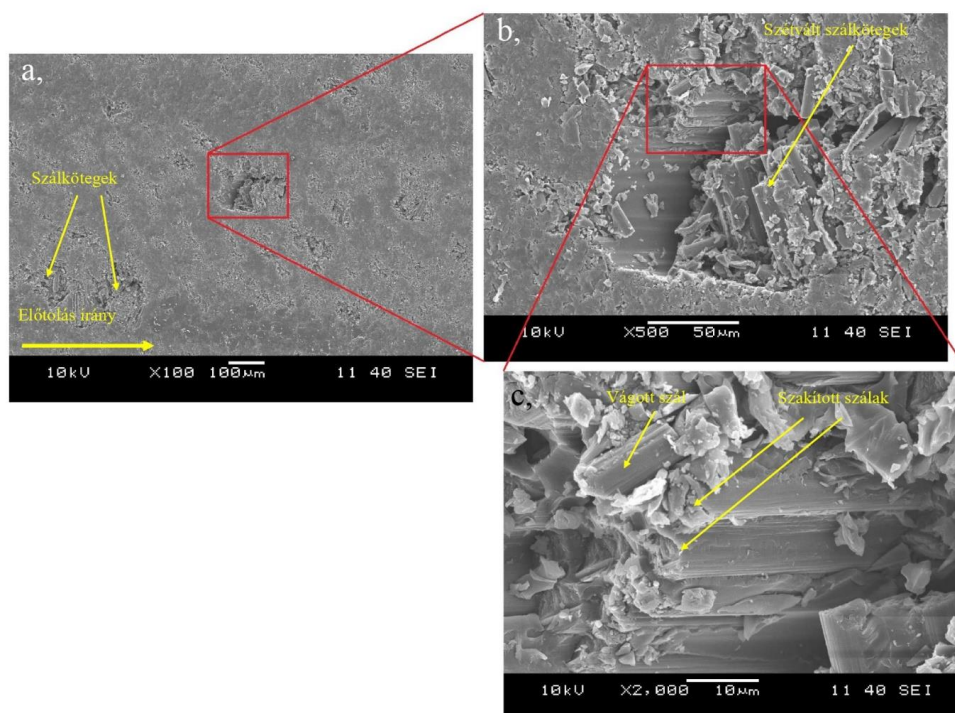
4-15. ábra Szálak elhajlása pásztázó elektronmikroszkóppal készített képen a 21-es beállítás esetén a, 500-szoros nagyításban b, 2000-szeres nagyításban

A 4-16. ábrán egy mátrix anyaggal nem fedett részen vizsgálhatjuk meg, hogy hogyan vágódtak el a szálak. A szálorientáció 90° fok, ezért a szálakat felülről kellene látnunk, de a képeken nem így van. A kihajlás lépett fel a forgácsolás során, és tisztán látszik, hogy egyes szálakat megfelelő irányba vágtuk el, majd ezután elhajlottak, és „visszahúzódtak”, míg más szálakba már az elhajlás után is belevágtunk, emiatt nem alakult ki egy szép egyenes vágás, hanem inkább egy szakításszerű roncsolódás alakult ki. Az ábrán kivehető, hogy a kisebb elvágott, és szakított száldarabokat is a felületre simítottuk.

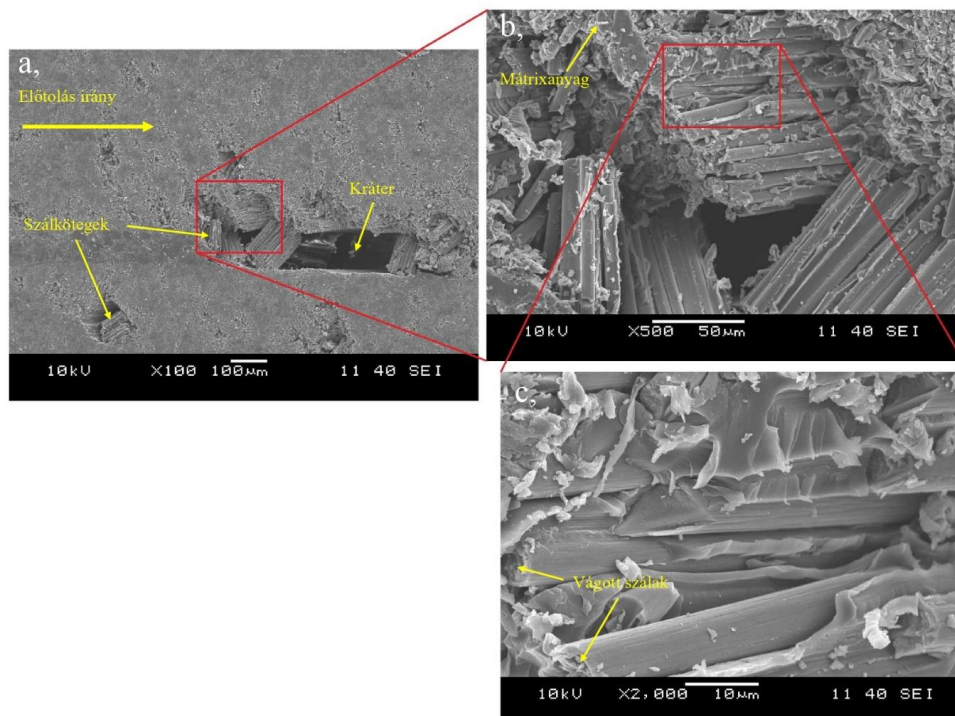


4-16. ábra Szálak elvágása pásztázó elektronmikroszkóppal készített képen a 21-es beállítás esetén a, 2000-szeres nagyításban b, 5000-szeres nagyításban c, 10000-szeres nagyításban

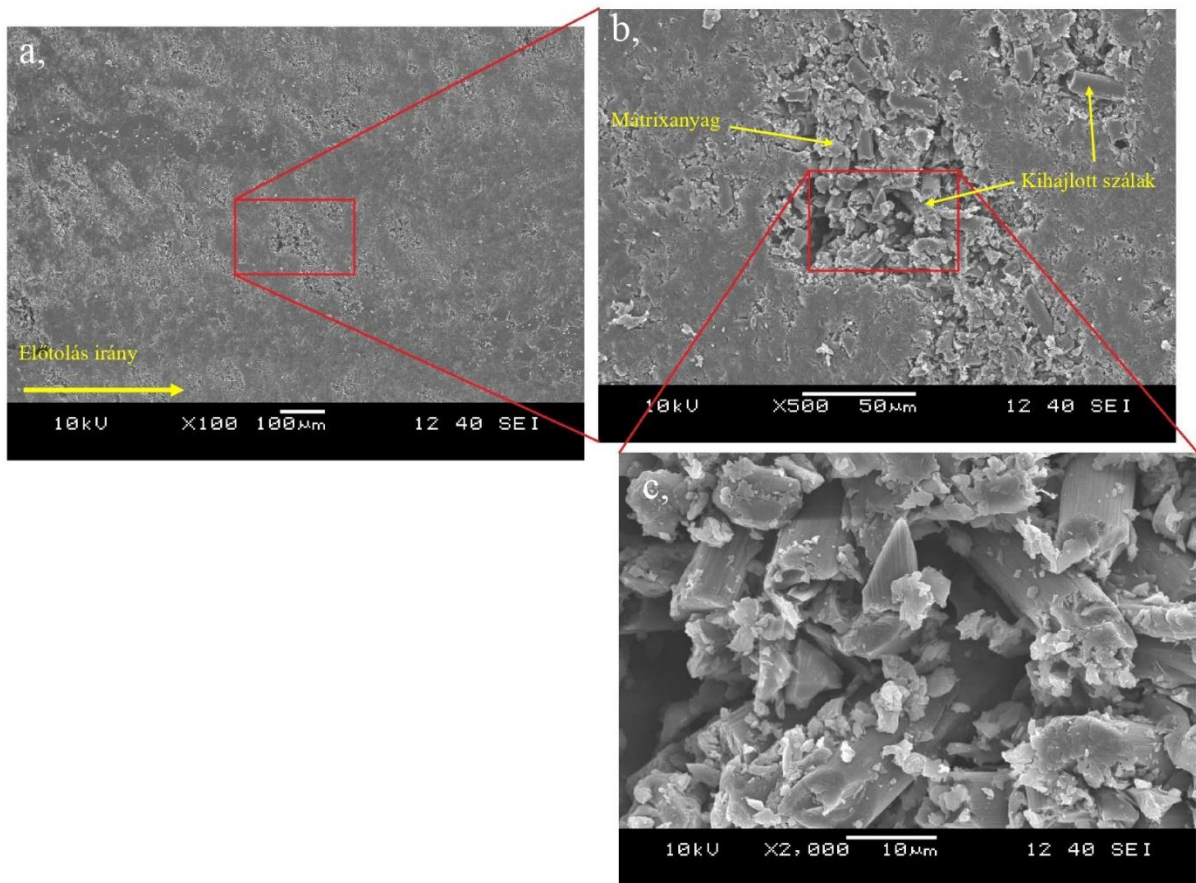
A 135° szálorientáció esetén a forgácsolás során sokkal több, és nagyobb szálköteget húztunk ki az anyagból a kedvezőtlen irány miatt. Ezen helyeken már akkora volt a hiba, hogy a mátrixanyag nem tudta teljesen elfedni a területet, emiatt lett ez a szálorientáció a legdurvább felületű. A szálkötegek kihúzását mutatja a 4-17. ábra, ahol már nem csak a vágott szálakat simította a felületbe a szerszám, hanem egész szálkötegek kerültek vissza a felületbe. A roncsolódás több irányba történt a forgácsolás során, így rosszabb felületet létrehozva. A 4-17. c, ábrán látható, ahogy a kötegekbe rendezett szálak szétváltak, és a legtöbb esetben szakítás szerűen tépődtek el. A 4-18. ábrán is ugyanezeket a megállapításokat láthatjuk, csak ebben az esetben a kráter nem a forgácsolás közben jött létre, hanem valószínűleg a CFRP kompozit gyártása során keletkezett. A 4-19. ábrán látható, hogy nem csak a kötegek kiválása, hanem az eddig is ismertetett problémák, mint száلكihajlás is szerepet játszottak a felület kialakulásában, ezen kívül jól látható, hogy mátrixanyagot, vágott szálakat, és más egyéb szennyeződések is belesimított a szerszám a felületbe.



4-17. ábra ábra Szálköteg kiválás pásztázó elektronmikroszkóppal készített képen a 29-es beállítás esetén a, 100-szoros nagyításban b, 500-szoros nagyításban c, 2000-szeres nagyításban

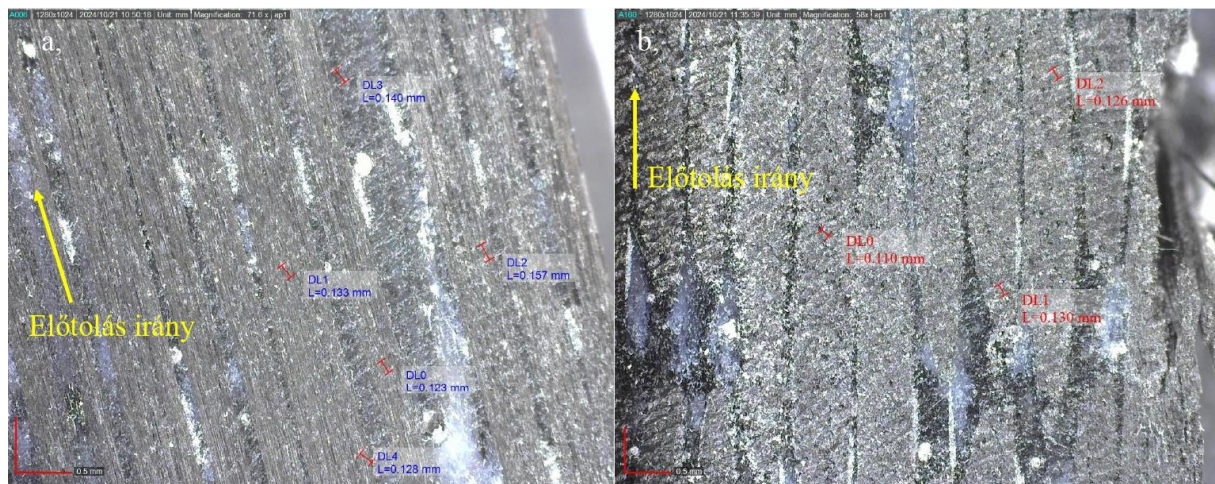


4-18. ábra ábra Szálköteg kiválás pásztázó elektronmikroszkóppal készített képen a 29-es beállítás esetén a, 100-szoros nagyításban b, 500-szoros nagyításban c, 2000-szeres nagyításban



4-19. ábra Szálak elhelyezése pásztázó elektronmikroszkóppal készített képen a 29-es beállítás esetén a, 100-szoros nagyításban b, 500-szoros nagyításban c, 2000-szeres nagyításban

Kitekintésképpen megfigyeltem, hogy azokon a képeken, ahol látható az előtolás sávok formájában lemérhető két sáv közti távolság, és elméletileg az előtolás értékét kellene visszaadnia a méréseknek. Érdekes, hogy a 4-20. ábra alapján látható módon, mindig kevesebb lett a mért méret, mint az elméleti. Ez azzal magyarázható, hogy forgácsolás közben az anyag pont az elméleti és a mért méret különbségével rugalmasan deformálódott, és elhajlott a szerszám elől, és csak a következő él tudta elvágni az adott szálköteget és mátrixanyagot, de ekkor is volt egy olyan térfogat, ahol rugalmasan deformálódott az anyag, és így ment a forgácsolás, ameddig a végére nem ért a munkadarabnak, ahol már nem volt anyag, ami el tudott volna hajlani. A középső szakaszon a szerszám állt, szóval ott nem lehetünk biztosak abban, hogy hogyan alakította a szerszám a felületet, a munkadarab szélén pedig már nehezen megfigyelhetők ezek a sávok. Ezt a megállapítást ortogonális forgácsolási vizsgálatokkal Wang és Zhang [23] is megfigyelte, csak az ő kutatások során nem az előtolás, hanem a fogásmélység volt mérhető ilyen módon.



4-20. ábra Előtolás mérése mikroszkóppal készített fotókon $f_z = 0,15$ mm a, 2-es beállítás esetén
b, 30-as beállítás esetén

5 Összefoglalás

A kutatásom során UD-CFRP anyagok síkmarással létrehozott felületi minőségét vizsgáltam, ezen kívül a mechanizmusok pontosabb megértése végett a megmunkálás közben forgácsolási erőt is mértem. A megfelelő szakirodalmi kutatás alapján meg tudtam tervezni a kísérleteket és kiértékeléseket, amelyeket végre is hajtottam. A forgácsolási erők kiértékelése során nem átlagot, hanem maximumok átlagát kerestem és értelmeztem. Ez alapján arra a megállapításra jutottam, hogy a fogásmélységnek, és az előtolásnak van a legnagyobb hatása a forgácsolási erőre, ahogy ez a szakirodalmi kutatás alapján várható volt [33], az egységnyi idő alatt megmunkálendő térfogat növelése a forgácsolási erőt is növeli. A szálorientációnak is szignifikáns hatása volt, de nem olyan esetben, mint más forgácsolási technológiák esetén [34]. Más szálorientációs szögek esetén alakultak ki a minimumok és maximumok, és amikor a forgácsolási erő értéke kisebb volt, jobb minőségű felületet alakult ki, míg a nagy forgácsoló erő esetén rosszabb. A fogások száma is hatással volt a forgácsoló erőre, de a vizsgált faktorok közül ennek volt a legkisebb hatása. A megmunkált felületek vizsgálata során azt a kijelentést tudom tenni, hogy a felületi minőséget legjobban a mátrix anyag elkenése határozza meg. A mátrix anyag kenődését legjobban befolyásoló faktor a szálorientációs szög, amelynek akkora hatása van, hogy a többi faktor hatása alig kimutatható. A 90°-os szálorientációs szög esetén lehet elérni a legjobb minőségű felületet. Általában kijelenthető, hogy több fogás esetén jobb felületi minőséget lehet elérni, és egyes esetekben kimutatható, hogy a kisebb előtolásnak is van hatása a kialakított felületre. A mátrix anyag kenését jól alátámasztják a két különböző mikroszkóppal készített felvételek, és ezen felvételek segítenek jobban megérteni a síkmarással létrehozott felületek összetételét. A mátrix anyag kenésével már Voss és mtsai [38] is foglalkoztak egy esztergálási kísérlet során. Voss is hasonló megállapítást tett, hogy a felmelegedő mátrix anyagot a szerszám elkente a felületen, ezzel elrejtve az esetleges száلكihúzódasokat, töréseket és egyéb mikro geometriai hibákat. Fontos kiemelnem, hogy a mátrix réteg alatt előfordulhatnak hibák, amely az anyag mechanikai gyengülését vonja maga után, ami beláthatatlan folyamatokat is eredményezhet a szerkezet, alkatrész használata során. Voss megállapításait Ashworth és mtsai [39], és Slamani és mtsai [40] is alá tudták támasztani.

Összegezve az UD-CFRP anyagok síkmarásával kialakított felület minőségét legerősebben a szálorientációs szög befolyásolja, és több fogás használata elősegítheti a jobb felület kialakítását. A felületet egy elkent mátrix réteg fedi el, amely nagyban befolyásolja a felületi minőséget. Ezen kívül fontosnak tartom kiemelni, hogy a jó felületi minőség nem feltétlenül jelenti az anyag megfelelő mechanikai tulajdonságainak meglétét.

A jövőben a kutatás kiegészítésének/ továbbfejlesztésének lehetőségei:

- A síkmart felület alatti mikro geometriai hibák keresése és vizsgálata
- A mátrixanyag kenésének pontosabb vizsgálata, nagyobb forgácsolási hosszon
- A megmunkált munkadarabok mechanikai vizsgálata
- Különböző szerszámokkal való síkmarás hatásainak vizsgálata

6 Felhasznált források

- [1] *Composites: Airbus continues to shape the future* | Airbus. URL <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2017-08-composites-airbus-continues-to-shape-the-future>. - abgerufen am 2024-11-06
- [2] *Composite materials for athletic footwear* - Toray PMC. URL <https://www.toraypmc.com/markets/athletic-footwear>. - abgerufen am 2024-11-06
- [3] *Composite Technologies for Exploration (CTE)* - NASA. URL <https://www.nasa.gov/composite-technologies-for-exploration-cte/>. - abgerufen am 2024-11-06
- [4] CZVIKOVSKY, TIBOR ;NAGY, PÉTER ; GAÁL, JÁNOS : *A polimerteknika alapjai Budapest* (2013).
- [5] GEIER, NORBERT ; XU, JINYANG ; PERESZLAI, CSONGOR ; POÓR, DÁNIEL ISTVÁN ; DAVIM, J. PAULO: Drilling of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: Difficulties, challenges and expectations. In: *Procedia Manufacturing* Bd. 54 (2021), S. 284–289
- [6] MAYUET, P. F. ; GIROT, F. ; LAMÍKIZ, A. ; FERNÁNDEZ-VIDAL, S. R. ; SALGUERO, J. ; MARCOS, M.: SOM/SEM based Characterization of Internal Delaminations of CFRP Samples Machined by AWJM. In: *Procedia Engineering, MESIC Manufacturing Engineering Society International Conference 2015*. Bd. 132 (2015), S. 693–700
- [7] LIU, XINYI ; LI, LIN ; YANG, SEN ; XU, MAN ; ZHONG, MIAN ; WANG, BIYI ; JIANG, YONG: Optimization of nanosecond laser drilling strategy on CFRP hole quality. In: *Journal of Materials Processing Technology* Bd. 332 (2024), S. 118559
- [8] GEIER, NORBERT ; DAVIM, J. PAULO ; SZALAY, TIBOR: Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 125 (2019), S. 105552
- [9] PERESZLAI, CSONGOR ; GEIER, NORBERT ; POÓR, DÁNIEL ISTVÁN ; BALÁZS, BARNABÁS ZOLTÁN ; PÓKA, GYÖRGY: Drilling fibre reinforced polymer composites (CFRP and GFRP): An analysis of the cutting force of the tilted helical milling process. In: *Composite Structures* Bd. 262 (2021), S. 113646
- [10] GEIER, NORBERT ; XU, JINYANG ; POÓR, DÁNIEL ISTVÁN ; DEGE, JAN HENDRIK ; DAVIM, J PAULO: A review on advanced cutting tools and technologies for edge trimming of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 266 (2023), S. 111037
- [11] HINTZE, WOLFGANG ; HARTMANN, DIRK: Modeling of Delamination During Milling of Unidirectional CFRP. In: *Procedia CIRP* Bd. 8 (2013), S. 444–449
- [12] WANG, CHANGYING ; LIU, GONGYU ; AN, QINGLONG ; CHEN, MING: Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 109 (2017), S. 10–22
- [13] LI, HAO ; QIN, XUDA ; HE, GAIYUN ; JIN, YAN ; SUN, DAN ; PRICE, MARK: Investigation of chip formation and fracture toughness in orthogonal cutting of UD-CFRP. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 82 (2016), Nr. 5, S. 1079–1088
- [14] AN, QINGLONG ; CAI, CHONGYAN ; CAI, XIAOJIANG ; CHEN, MING: Experimental investigation on the cutting mechanism and surface generation in orthogonal cutting of UD-CFRP laminates. In: *Composite Structures* Bd. 230 (2019), S. 111441
- [15] ZHANG, JIN ; LIN, GANG ; VAIDYA, UDAY ; WANG, HAO: Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 250 (2023), S. 110463

- [16] ENGELS, ALEXANDER ; ENG, B: Development of a smart production line for large CFRP box structures
- [17] CAMPBELL, F. C.: *Structural Composite Materials* : ASM International, 2010. — Google-Books-ID: D3Wta8e07t0C — ISBN 978-1-61503-140-5
- [18] *A350 Less Operating Cost. More Capabilities.* | A350 | Aircraft | Airbus Aircraft. URL <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a350-the-long-range-leader/a350-less-operating-cost-more-capabilities>. - abgerufen am 2024-11-08
- [19] DR. GEIER NORBERT : *Egyirányban szénszállal erősített polimer (UD-CFRP) kompozitok anyagok forgácsolt alak sajátosságainak mikro- és makrogeometriai vizsgálata és jellemző mérőszámrendszerének kidolgozása*, Budapest (2019)
- [20] SUNDI, S. A. ; IZAMSHAH, R. ; KASIM, M. S. ; JAAFAR, M. F. ; HASSAN, M. H.: Milling/Trimming of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP): Recent Advances in Tool Geometrical Design. In: HAMEED SULTAN, M. T. ; AZMI, A. I. ; MAJID, M. S. A. ; JAMIR, M. R. M. ; SABA, N. (Hrsg.): *Machining and Machinability of Fiber Reinforced Polymer Composites*. Singapore : Springer, 2021 — ISBN 978-981-334-153-1, S. 101–128
- [21] WANG, FU-JI ; YIN, JUN-WEI ; MA, JIAN-WEI ; JIA, ZHEN-YUAN ; YANG, FAN ; NIU, BIN: Effects of cutting edge radius and fiber cutting angle on the cutting-induced surface damage in machining of unidirectional CFRP composite laminates. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 91 (2017), Nr. 9, S. 3107–3120
- [22] LOPRESTO, V. ; LANGELLA, A. ; CAPRINO, G. ; DURANTE, M. ; SANTO, L.: Conventional Orthogonal Cutting Machining on Unidirectional Fibre Reinforced Plastics. In: *Procedia CIRP* Bd. 62 (2017), S. 9–14
- [23] WANG, X. M. ; ZHANG, L. C.: An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Bd. 43 (2003), Nr. 10, S. 1015–1022
- [24] AN, QINGLONG ; MING, WEIWEI ; CAI, XIAOJIANG ; CHEN, MING: Study on the cutting mechanics characteristics of high-strength UD-CFRP laminates based on orthogonal cutting method. In: *Composite Structures* Bd. 131 (2015), S. 374–383
- [25] BÖHLAND, FELICITAS ; HILLIGARDT, ANDREAS ; SCHULZE, VOLKER: Analysis of subsurface damage during milling of CFRP due to spatial fibre cutting angle, tool geometry and cutting parameters. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 281 (2024), S. 111533
- [26] LI, HAO NAN ; WANG, JUN PENG ; WU, CHAO QUN ; ZHAO, YONG JIE ; XU, JIE ; LIU, XIAOLING ; ZHU, WEI QIANG: Damage behaviors of unidirectional CFRP in orthogonal cutting: A comparison between single- and multiple-pass strategies. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 185 (2020), S. 107774
- [27] VOSS, ROBERT ; SEEHOLZER, LUKAS ; KUSTER, FRIEDRICH ; WEGENER, KONRAD: Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* Bd. 18 (2017), S. 75–91
- [28] SUI, JIANBO ; WANG, CHENGYONG: Machinability study of unidirectional CFRP laminates by slot milling. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 100 (2019), Nr. 1, S. 189–197
- [29] GEIER, NORBERT ; SZALAY, TIBOR ; BIRÓ, ISTVÁN: Trochoid milling of carbon fibre-reinforced plastics (CFRP). In: *Procedia CIRP* Bd. 77 (2018), S. 375–378
- [30] ZHANG, LIFENG ; ZHANG, XIAOGUANG: A comparative experimental study of unidirectional CFRP high-speed milling in up and down milling with varied angles. In: *Journal of Manufacturing Processes* Bd. 101 (2023), S. 1147–1157

- [31] QIN, XUDA ; BAO, ZHENGWEI ; WU, WEIZHOU ; LI, HAO ; LI, SHIPENG ; ZHAO, QING: Surface quality evaluation for CFRP milling and its impact on the mechanical properties. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 122 (2022), Nr. 2, S. 1083–1097
- [32] HADDAD, MADJID ; ZITOUNE, REDOUANE ; EYMA, FLORENT ; CASTANIE, BRUNO: Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 66 (2014), S. 142–154
- [33] LI, X. ; JIAO, A. ; XU, M. ; LIU, G.: Study on Cutting Force and Surface Topography of Peripheral Milling CFRP. In: *Experimental Techniques* Bd. 47 (2023), Nr. 3, S. 633–653
- [34] GEIER, NORBERT: Influence of fibre orientation on cutting force in up and down milling of UD-CFRP composites. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 111 (2020), Nr. 3, S. 881–893
- [35] PECAT, OLIVER ; RENTSCH, RÜDIGER ; BRINKSMEIER, EKKARD: Influence of Milling Process Parameters on the Surface Integrity of CFRP. In: *Procedia CIRP, Fifth CIRP Conference on High Performance Cutting 2012*. Bd. 1 (2012), S. 466–470
- [36] *TDMS Reader*. URL <https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30023-tdms-reader>. - abgerufen am 2024-11-10
- [37] *Plot types — Matplotlib 3.9.2 documentation*. URL https://matplotlib.org/stable/plot_types/index.html. - abgerufen am 2024-11-10
- [38] VOß, ROBERT ; HENERICHS, MARCEL ; KUSTER, FRIEDRICH ; WEGENER, KONRAD: Chip Root Analysis after Machining Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) at Different Fiber Orientations. In: *Procedia CIRP* Bd. 14 (2014), S. 217–222
- [39] ASHWORTH, SAM ; FAIRCLOUGH, J. PATRICK A. ; MEREDITH, JAMES ; TAKIKAWA, YOSHIHIRO ; KERRIGAN, KEVIN: Effects of tool coating and tool wear on the surface quality and flexural strength of slotted CFRP. In: *Wear* Bd. 498–499 (2022), S. 204340
- [40] SLAMANI, MOHAMED ; CHATELAIN, JEAN-FRANÇOIS ; HAMEDANIANPOUR, HOSSEIN: Influence of machining parameters on surface quality during high speed edge trimming of carbon fiber reinforced polymers. In: *International Journal of Material Forming* Bd. 12 (2019), Nr. 3, S. 331–353

7 Mellékletek

ANOVA számolásokat a Minitab szoftverben végeztem. A kiértékelésekhez külön táblázatokat hoztam létre, hogy a szoftver a beépített szórás számológájával tudjon számolni. Statisztikai alapon az $a_p \cdot a_p$, és az $f_z \cdot f_z$ összetevőket nem vette figyelembe a számolás során.

A forgácsolási erők kiértékelése során a kiválasztott szakaszt 4 részre bontottam, és a felfutási és lefutási értékeket elhagyva 3 erőérték alapján történt az ANOVA számítás.

7-1. táblázat ANOVA F_e vs. ψ , a_p , f_z , i

	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modell	11	30415,9	2765,1	79,26	0,000
Lineáris	4	24383,6	6095,9	174,75	0,000
ψ°	1	898,7	898,7	25,76	0,000
a_p mm	1	13943,1	13943,1	399,70	0,000
f_z mm	1	9276,1	9276,1	265,91	0,000
i	1	265,7	265,7	7,62	0,007
Négyzetek	1	4683,9	4683,9	134,27	0,000
$\psi \cdot \psi^\circ$	1	4683,9	4683,9	134,27	0,000
Kereszthatások	6	1348,4	224,7	6,44	0,000
$\psi \cdot a_p$	1	223,8	223,8	6,42	0,013
$\psi \cdot f_z$	1	4,1	4,1	0,12	0,733
$\psi \cdot i$	1	192,5	192,5	5,52	0,021
$a_p \cdot f_z$	1	731,8	731,8	20,98	0,000
$a_p \cdot i$	1	107,4	107,4	3,08	0,083
$i \cdot f_z$	1	88,8	88,8	2,55	0,114
Error	84	2930,3	34,9		
Lack-of-Fit	20	2730,3	136,5	43,69	0,000
Pure Error	64	200,0	3,1		
Total	95	33346,2			

7-2. táblázat ANOVA R_a vs. ψ , a_p , f_z , i

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modell	11	24,468	2,2244	3,20	0,001
Lineáris	4	14,676	3,6689	5,28	0,001
ψ°	1	11,479	11,4792	16,52	0,000
a_p mm	1	1,124	1,1239	1,62	0,205
f_z mm	1	0,881	0,8806	1,27	0,262
i	1	1,192	1,1920	1,72	0,192
Négyzetek	1	7,263	7,2633	10,45	0,002
$\psi \cdot \psi^\circ$	1	7,263	7,2633	10,45	0,002
Kereszthatások	6	2,529	0,4215	0,61	0,725
$\psi \cdot a_p$	1	0,763	0,7632	1,10	0,296
$\psi \cdot f_z$	1	0,305	0,3046	0,44	0,509
$\psi \cdot i$	1	0,010	0,0103	0,01	0,903
$a_p \cdot f_z$	1	0,243	0,2426	0,35	0,556
$a_p \cdot i$	1	1,051	1,0514	1,51	0,221
$i \cdot f_z$	1	0,157	0,1569	0,23	0,635
Error	148	102,864	0,6950		
Lack-of-Fit	20	9,537	0,4768	0,65	0,864
Pure Error	128	93,327	0,7291		
Total	159	127,332			

7-3. táblázat ANOVA R_z vs. ψ , a_p , f_z , i

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modell	11	4690,5	426,41	2,32	0,012
Lineáris	4	3945,5	986,36	5,37	0,000
ψ°	1	3475,7	3475,70	18,93	0,000
a_p mm	1	23,9	23,95	0,13	0,718
f_z mm	1	146,9	146,88	0,80	0,373
i	1	298,9	298,94	1,63	0,204
Négyzetek	1	213,2	213,21	1,16	0,283
$\psi \cdot \psi^\circ$	1	213,2	213,21	1,16	0,283
Kereszthatások	6	531,9	88,64	0,48	0,820
$\psi \cdot a_p$	1	0,0	0,02	0,00	0,992
$\psi \cdot f_z$	1	6,5	6,46	0,04	0,851
$\psi \cdot i$	1	17,5	17,49	0,10	0,758
$a_p \cdot f_z$	1	18,4	18,43	0,10	0,752
$a_p \cdot i$	1	479,2	479,21	2,61	0,108
$i \cdot f_z$	1	10,3	10,25	0,06	0,814
Error	148	27171,7	183,59		
Lack-of-Fit	20	3056,7	152,83	0,81	0,696
Pure Error	128	24115,0	188,40		
Total	159	31862,2			

7-4. táblázat ANOVA R_q vs. ψ , a_p , f_z , i

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modell	11	67,248	6,1134	2,53	0,006
Lineáris	4	48,512	12,1280	5,02	0,001
ψ°	1	41,255	41,2550	17,09	0,000
a_p mm	1	1,161	1,1611	0,48	0,489
f_z mm	1	1,262	1,2620	0,52	0,471
i	1	4,834	4,8337	2,00	0,159
Négyzetek	1	12,494	12,4937	5,17	0,024
$\psi \cdot \psi^\circ$	1	12,494	12,4937	5,17	0,024
Kereszthatások	6	6,242	1,0403	0,43	0,857
$\psi \cdot a_p$	1	0,257	0,2574	0,11	0,744
$\psi \cdot f_z$	1	0,325	0,3252	0,13	0,714
$\psi \cdot i$	1	0,002	0,0017	0,00	0,979
$a_p \cdot f_z$	1	0,797	0,7967	0,33	0,567
$a_p \cdot i$	1	4,614	4,6138	1,91	0,169
$i \cdot f_z$	1	0,247	0,2473	0,10	0,749
Error	148	357,314	2,4143		
Lack-of-Fit	20	33,716	1,6858	0,67	0,852
Pure Error	128	323,598	2,5281		
Total	159	424,561			

Szerszám katalógus, és a gyártó ajánlása a forgácsoláshoz

<https://perfor.hu/ujjmaro-2-elu-vhm-bevonatos>

SOLID CARBIDE ALCRONA END MILLS, DIN, Z2, LONG. CHAMFER EDGE PROTECT.

HM CARB

ALCRONA® COATED

DIN 6527L

Z2

30°

e8

Universal application, life span, profitability.

FRESA METAL DURO ALCRONA, DIN, Z2, LARGA.

FRESA IN MD DIN Z2 CORTA. SMUSSO DI PROTEZIONE.

Polivalencia, duración de vida, rentabilidad.

FRESA IN MD DIN Z2 CORTA. SMUSSO DI PROTEZIONE.

Polivalente, lunga durata, redditività.

AB Steels for heat treatment 200-700N/mm²
Aceros para tratamiento térmico 200-700 N/mm²
Acciai per trattamento termico 200-700N/mm²

CD Steels for heat treatment 700-1200N/mm²
Aceros para tratamiento térmico 700-1200 N/mm²
Acciai per trattamento termico 700-1200N/mm²

FGH Stainless Steel
Aceros inoxidables
Acciai inossidabili

IJ Cast iron
Fundiciones
Ghisa

KLM Aluminium alloys
Aleaciones de aluminio
Leghe di alluminio

8236521	EAN	Ø	d2	L	I2	QTY	PCB
82365210200	3221910873950	2	3	38	6	1	1
82365210250	3221910873967	2.5	3	38	7	1	1
82365210300	3221910873974	3	3	38	7	1	1
82365210350	3221910873981	3.5	6	57	7	1	1
82365210400	3221910873998	4	6	57	8	1	1
82365210450	3221910874001	4.5	6	57	8	1	1
82365210500	3221910874018	5	6	57	10	1	1
82365210600	3221910874025	6	6	57	10	1	1
82365210700	3221910874032	7	8	63	13	1	1
82365210800	3221910874049	8	8	63	16	1	1
82365210900	3221910874056	9	10	72	16	1	1
82365211000	3221910874063	10	10	72	19	1	1
82365211200	3221910874070	12	12	83	22	1	1
82365211400	3221910874087	14	14	83	22	1	1
82365211600	3221910874094	16	16	92	26	1	1
82365211800	3221910874100	18	18	92	26	1	1
82365212000	3221910874117	20	20	104	32	1	1

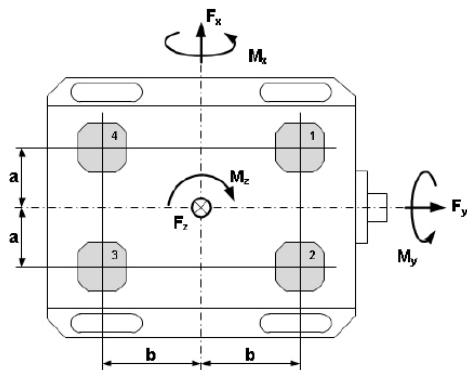
7-1. ábra A kutatás során használt szerszám katalógus oldala

7-5. táblázat Forgácsolási erő mintavételezési frekvencia számoló

Forgácsolási sebesség	v_c	100	m/min
Fogak	z	2	-
Átmérő	d	12	mm
Főorsó fordulatszám	N	2653,928	1/min 44,23213 1/s
Szögenkénti mérés	α	5	°
Ajánlott frekvencia:	f_a	3184,713	Hz
Használt frekvencia	f	3500	Hz

Mintavételezési frekvencia során használt képlet:

$$f_a = \frac{360}{\alpha} \cdot N$$



The individual forces and moments can be calculated as follows:

$$F_x = F_{x1+2} + F_{x3+4}$$

$$F_y = F_{y1+4} + F_{y2+3}$$

$$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}$$

$$M_x = b \cdot (F_{z1} + F_{z2} - F_{z3} - F_{z4}) \cdot kM_x$$

$$M_y = a \cdot (-F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} - F_{z4}) \cdot kM_y$$

$$M_z = b \cdot (-F_{x1+2} + F_{x3+4}) + a \cdot (F_{y1+4} - F_{y2+3}) \cdot kM_z$$

a and b are the dynamometer constants in the above formulas, while kM represent the correction factors.

The values for Type 9257B... are:

$$a = 30 \text{ mm}$$

$$b = 57,5 \text{ mm}$$

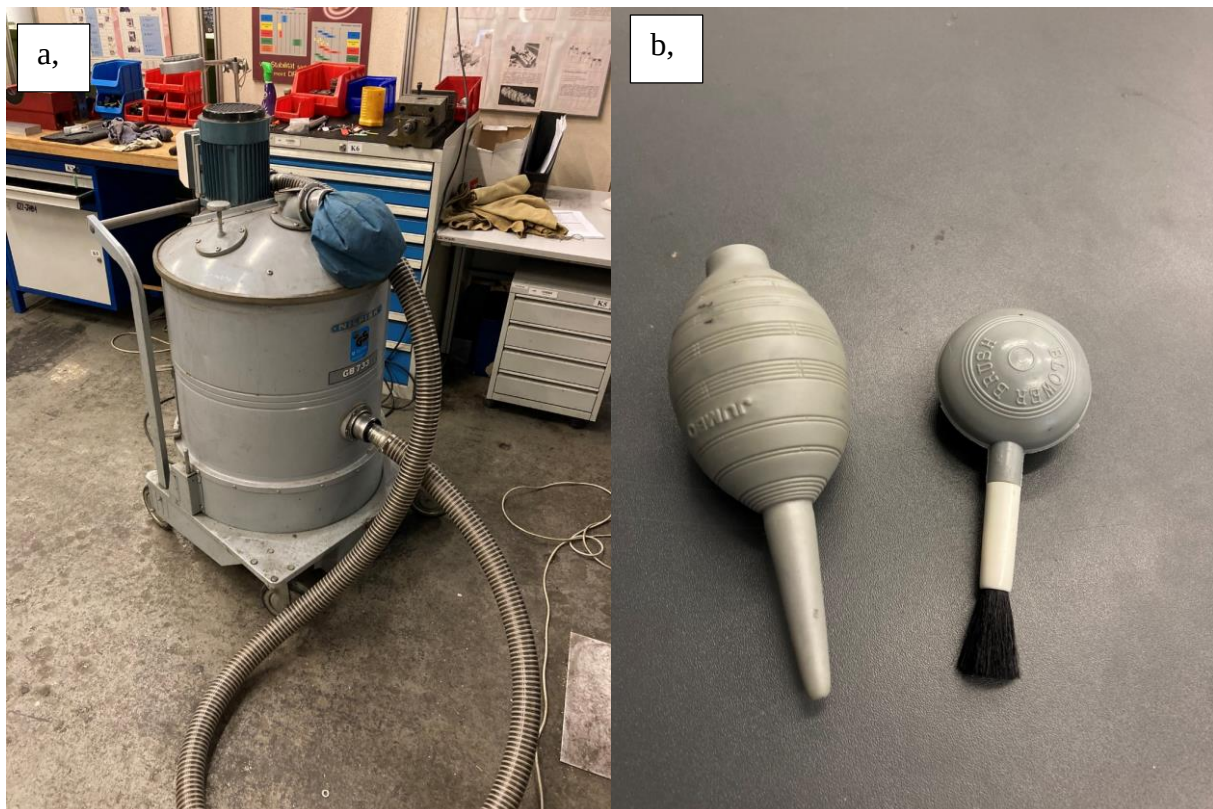
7-2. ábra KISTLER 9257B kézikönyvének 16. oldala mért erő számítása

A kísérletek kiértékelése során használt programok algoritmusának leírás:

- Forgácsolási erő kiértékelés (Matlab):
 - Adatok beolvasása, adatszerkezet ellenőrzés
 - Adatok szűrése, frekvencia spektrum előállítás, és gyors Fourier transzformáció használata
 - Adatok megjelenítése
 - Eredő erő kiszámolása
 - Beállításokra bontás meghatározott időintervallumokkal
 - Max értékek kiválasztása, átlagolása, szórás számítása
 - ANOVA adatokhoz a beállítás 4 részre bontása
 - ANOVA maximumok keresése, átlagolása
- Forgácsolási erők oszlopdigrammjainak rajzoltatása:
 - Adatok beolvasása
 - Adatok rendezése listákba, megfelelő sorrend kialakítása
 - Összes eredő erő kirajzolása a fogások számával csoportosítva
 - Két faktor rögzítésével lista kialakítás, majd oszlopdigramm rajzoltatás

- Felületi érdességmérés adatok diagrammjának kirajzoltatása:
 - Adatok beolvasása
 - Adatok struktúrába rendezése
 - Szükséges függvények definiálása
 - Diagrammok rajzoltatása:
 - Faktorok válogatása
 - Faktorokhoz tartozó értékek megfelelő párosítása
 - Diagramm kirajzolása

A programok írása során szintaktikai ellenőrzésére, és megfelelő beépített függvények keresésére a Microsoft által fejlesztett Copilot mesterséges intelligenciát alkalmaztam. Ha a pontos kódokat szeretné használni, megnézni, kérem vegye fel velem a kapcsolatot levibukor@gmail.com e-mail címen.



7-3. ábra A kísérlet során felhasznált Nilfisk GB733 típusú ipari porszívó b, SEM mérés előkészületéhez használt tisztító eszközök

Kísérleti jegyzőkönyv

1. KUTATÁS CÉLJA

Szárazállal erősített polimer (CFRP) kompozit anyagok szúrása, és felületi vizsgálata. Optimalizációs paramétereket támaszt a felületi minőség javítása érdekében: szúrásparaméterek, fogás mélység, szúrás, szúrások számának változtatásával.

2. KÍSÉRLETI KÖRNYEZET

2.1. Felhasznált gépek, szerszámok, műszerek és eszközök

- Nilek GB713 ipari posztó
- Kanfia B646 háromtengelyes CNC marógép
- Kiváló 9257B háromkomponensű erőmérő cella
- Kiváló 5070 töltő erősítő
- Minutony SJ-400 szúrás
- Dino-Lite AP7013MCT szúrás
- Tivoli P652 Z2 012 marozás

2.2. Rögzített paraméterek és körülmények

- Szúrás
- $v = 100$ m/min
- Fogás irány: ip-szúrás
- Szúrás megmunkálás
- Fogás szélesség 6 mm

KUTATÁSI ALAPADATOK	
Projekt:	
Azonosító:	CFRPSIK
Verzió:	Baker Levente
Készítve:	
Dátum:	2024
Helyszín:	BME „G” épület
Háttérképek:	25 °C
Megjegyzés:	
Szerzők:	
Készítve:	Baker Levente (jegyzőkönyv)
Laboráns 1:	Kálmán Dávid (pórtípus)
Laboráns 2:	Béla Mátyás (előzetes)
Laboráns 3:	Dr. Gábor Németh (gépkezelő)

1

2.3. Faktorok

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység	Értéktartomány		Szűrők száma	Vizsgált szintek
			Legjobb szint	Legrosszabb szint		
Fogásmélység	a_p	mm	1	2	2	1,2
Előtolás	f_z	mm/rev	0,05	0,15	2	0,025, 0,075
Fogásvétel száma	i	-	1	2	2	1,2
Szúrások száma	n	-	0	135	4	0,45, 90, 135

2

3. KÍSÉRLETTERVEZÉSI MÁTRIX

Próbatest azonosító	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	CFRP1	0	1	2	0,05																											
2	CFRP1	0	1	2	0,15																											
3	CFRP1	0	2	1	0,15																											
4	CFRP1	0	2	1	0,05																											
5	CFRP2	0	1	2	0,05																											
6	CFRP2	0	1	2	0,15																											
7	CFRP2	0	2	1	0,15																											
8	CFRP2	0	2	1	0,05																											
9	CFRP3	45	1	1	0,05																											
10	CFRP3	45	1	1	0,15																											
11	CFRP3	135	2	1	0,15																											
12	CFRP3	135	2	1	0,05																											
13	CFRP4	45	1	2	0,05																											
14	CFRP4	45	1	2	0,15																											
15	CFRP4	135	2	2	0,15																											
16	CFRP4	135	2	2	0,05																											
17	CFRP5	90	1	1	0,05																											
18	CFRP5	90	1	1	0,15																											
19	CFRP5	90	2	1	0,15																											
20	CFRP5	90	2	1	0,05																											
21	CFRP6	90	1	2	0,05																											
22	CFRP6	90	1	2	0,15																											
23	CFRP6	90	2	2	0,15																											
24	CFRP6	90	2	2	0,05																											
25	CFRP7	135	1	1	0,05																											
26	CFRP7	135	1	1	0,15																											
27	CFRP7	45	2	1	0,15																											
28	CFRP7	45	2	1	0,05																											
29	CFRP8	135	1	2	0,05																											
30	CFRP8	135	1	2	0,15																											
31	CFRP8	45	2	2	0,15																											
32	CFRP8	45	2	2	0,05																											

3

Próbatestek befoglaló méretei:

Próbatest azonosító	Képlet Z irányba (mm)	X irányú méret (mm)	X legkisebb (mm)	Y irányú méret (mm)	Y legkisebb (mm)
CFRP1	9,98	29,88	29,83	14,25	14,15
CFRP2	9,9	29,95	29,85	13,79	13,58
CFRP3	9,95	29,91	29,88	13,51	13,17
CFRP4	9,86	29,89	29,84	13,36	13,20
CFRP5	10	29,95	29,89	13,51	13,06
CFRP6	10,15	29,92	29,85	14,09	13,79
CFRP7	9,84	29,98	29,83	14,05	13,77
CFRP8	10	29,99	29,89	14,61	14,56

Koordinátságok méretei:

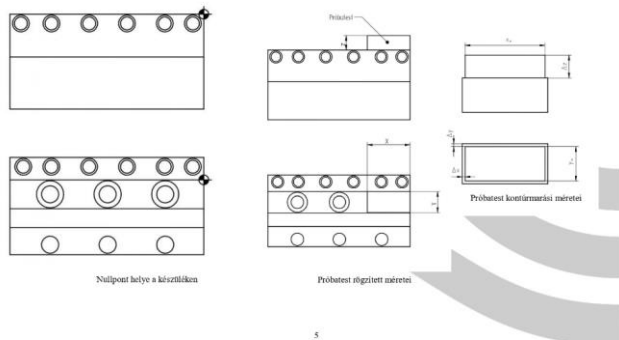
Δx (mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	X (mm)	Y (mm)	y_0 (mm)	x_0 (mm)
6	1	1	29,99	14,61	29,99	12,61

$$x_m = X - \Delta x$$

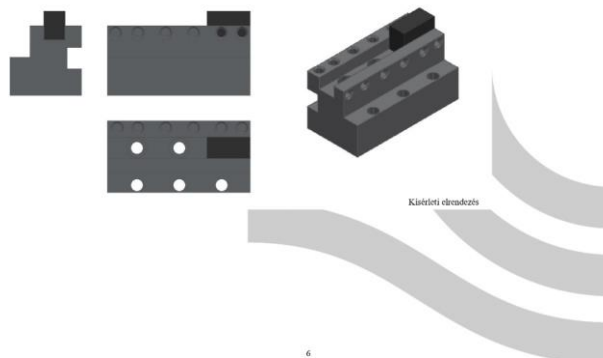
$$y_m = Y - \Delta y$$

4

Alkatrészrajz:



5



6

További megjegyzések:

- Az erőmérő a hosszanti oldal mentén 5 mm-el kisebb az elérés
- A készleték hosszanti oldala mentén ± 0.02 mm az eltérés
- Patinás szerelvények, 49 mm a szerelvény kőgős
- 8-as szerelvények
- Mindegyik rögzítő csavarjai J5m nyomatékkal meghúrtva
- Foglaltság változtatás a tolnéző helyén 0.5: 1-ől
- Előző sebesség változtatás 0.1: 0.16-ól
- Miniatűrvezérlés frekvencia 3500 Hz az erőmérőnél
- Mérőhatár 1000 N
- Erőmérő típusa 100 N-V
- A próbatestek jelölése az azonosítóba található számmal történik
- A kísérlet során a kísérletben a kísérletben nem minden esetben marra le
- A kísérletben rögzítés miatt néhány próbatesten a felirat megkopott, további megkülönböztetésre szolgáló jelölés: 3. próbatest jobb alsó sarkába 1 pont; 5. próbatest jobb alsó 3 pont; 6. próbatest jobb alsó sarkába 2 pont
- A szilárdságú szög meghatározása: az erőmérő sebesség irányának és a szilárdságú irányának irányával egyező irányú beérő szög

7

4. ZÁRADÉK

Kísérlet végén: 2024.10.11

A kísérlet adatok leírása és a mérési környezet emellett állapotba visszarendszerezve. Amortizálódott eszközök lejelentve (janos.nurbert@gtk.bme.hu)

A kísérlet adatokat, a metadatum és a kísérlet jegyzőkönyvet felvittem a CMG OneDrive tárhelyre.


Kísérletvezető

8

8 Summary

In my research, I examined the surface quality of UD-CFRP materials created by face milling. Additionally, to better understand the underlying mechanisms, I measured the cutting forces during machining. Based on appropriate literature research, I was able to design and conduct experiments and evaluations. When evaluating the cutting forces, I focused on the maximums rather than averages. This led me to conclude that the depth of cut and the feed rate have the greatest impact on the cutting force, as anticipated from the literature [33]. Increasing the volume to be machined per unit time also increases the cutting force. Fiber orientation also had a significant effect, though not in the same manner as with other cutting technologies [34]. Different fiber orientation angles resulted in varying minimums and maximums, and when the cutting force was lower, a better surface quality was achieved, while a higher cutting force led to a poorer surface quality. The number of passes also affected the cutting force, but it had the least impact among the factors studied.

In examining the machined surfaces, I can state that the surface quality is largely determined by the smearing of the matrix material. The factor most influencing matrix smearing is the fiber orientation angle, which has such a significant effect that the influence of other factors is barely detectable. The best surface quality can be achieved at a fiber orientation angle of 90° . Generally, it can be said that multiple passes can lead to better surface quality, and in some cases, it can be shown that lower feed rates also have an impact on the resulting surface. The smearing of the matrix material is well supported by images taken with two different microscopes, helping to better understand the composition of surfaces created by face milling. Voss et al. [38] also addressed the smearing of the matrix material in a turning experiment. Voss similarly concluded that the heated matrix material was smeared by the tool on the surface, thus hiding potential fiber pull-outs, breaks, and other micro-geometric defects. It is important to note that defects can occur beneath the matrix layer, leading to mechanical weakening of the material, which could result in unforeseeable consequences during the use of the structure or component. Voss's findings were supported by Ashworth et al. [39] and Slamani et al. [40].

In summary, the surface quality of UD-CFRP materials created by face milling is most strongly influenced by the fiber orientation angle, and the use of multiple passes can promote better surface quality. The surface is covered by a smeared matrix layer, which significantly affects the surface quality. Additionally, it is important to emphasize that good surface quality does not necessarily imply adequate mechanical properties of the material.