

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

BUKOR Levente¹, Dr. GEIER Norbert¹

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3, T épület 4. em., Tel.: 06/1-463-2515, Fax: 06/1-463-3176,
E-mail: info@manuf.bme.hu, Honlap: <http://manuf.bme.hu>

Abstract

The research investigated the effects of face milling on CFRP composites, with a particular focus on surface quality. Face milling can serve as a cost-effective method for preparing orthogonal cutting experiments while maintaining nominal chip thickness. The findings indicate that cutting force is primarily influenced by depth of cut and feed, while surface quality is mainly affected by fibre orientation. The results contribute to the development of face milling processes and offer opportunities for the reuse of workpieces for further research purposes.

Keywords: UD-CFRP, Machining, Face milling, Surface quality, Cutting Force

Kivonat

A kutatás a CFRP kompozitok síkmarásának hatásait vizsgálta, különös tekintettel a felületi minőségre. A síkmarás költséghatékony mód lehet az ortogonális forgácsolási kísérletek előkészítésének, fenntartva a névleges forgácsvastagságot. A vizsgálatok alapján a forgácsolási erőt leginkább a fogásmélység és az előtolás, míg a felületi minőséget a szálorientációs szög befolyásolta. Az eredmények hozzájárulnak a síkmarási eljárások fejlesztéséhez, és lehetőséget teremtenek a munkadarabok újra felhasználására.

Kulcsszavak: UD-CFRP, Forgácsolás, Síkmarás, Felületi minőség, Forgácsolási erő

1. BEVEZETÉS

A szénszállal erősített polimerek (CFRP) egyre népszerűbbek, többek között a repülőgépiparban [1], sporteszközök gyártásában [2] és az űrtechnológiában [3]. Ezek az anyagok kiemelkedő szilárdságot biztosítanak alacsonyabb sűrűség mellett, mint a hasonló tulajdonságokkal rendelkező fémek [4]. A mérnöki gyakorlatban a terhelések, és igénybevételek jól meghatározható vonalak mentén történnek, amely vonalakon nagyságrendekkel nagyobb szilárdságra van szükség [4]. Ebben az esetben tudnak megoldást nyújtani az egyirányban szénszálerősített polimer (UD-CFRP) kompozit anyagok, amelyeknél az erősítő szálak iránya a terhelések, és igénybevételek vonalán fekszenek. Bár a kompozit anyagokat közel kész formára gyártják, gyakran szükségessé válik az utólagos megmunkálás méret- és alakpontatlanságok, illetve funkcionális követelmények (például furatok kialakítása) miatt [5]. Az utólagos forgácsolás gazdaságos megoldást nyújt erre, amely lehet hagyományos (például fűrés, marás) vagy nem hagyományos (például vízsugaras vágás [6], lézeres technológiák [7]). A leggyakoribb megmunkálási feladatok a furatok, és kontúrok kialakítása. A furatok fűrésszel történő előállítása során a delamináció, vagyis a rétegek szétválása a be- és kilépési pontokon jelentős kihívást jelent [8]. Ugyanakkor speciális marási szerszámpályák is alkalmazhatók a furatok kialakítására [9]. A kontúrgeometriák kialakítása esetében a maradék anyag eltávolítása, és a megfelelő élgeometria biztosítása a cél, amelyhez a hagyományos élmarás hatékony megoldás, hiszen pontos és sima felületeket eredményez [10], [11].

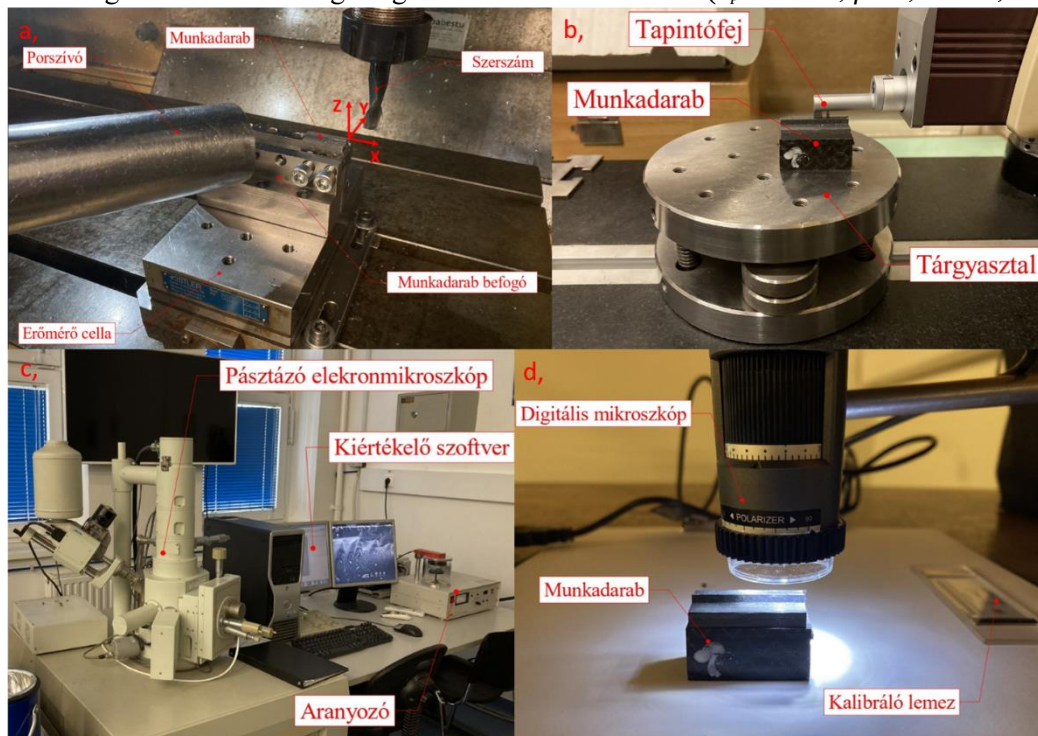
Noha a CFRP anyagokat ortogonális forgácsolással jellemzően nem munkálják meg az iparban, ezen kísérleti eredmények fontos információkat nyújtanak a CFRP anyagok viselkedéséről és a szimulációs paraméterek meghatározásáról. Ezen technikák segítenek megérteni az anyagok forgácsolás utáni felületi tulajdonságait is [12–14]. Az ortogonális forgácsolás során fontos a forgácsvastagság állandóan tartása, amelyre egy gazdaságos megoldást tud nyújtani a síkmarás, így ezen kutatás célja az UD-CFRP kompozitok síkmarással történő megmunkálása utáni felületi minőség vizsgálata. Továbbiakban a kutatás kiindulópontot adhat más kísérletekhez, vagy egy eddig használt munkadarabok újra felhasználására további kutatási célokra.

2. KÍSÉRLETI ÉS MÉRÉSI KÖRNYEZET

Az UD-CFRP kompozitokon négy faktor hatása került megvizsgálásra: a szálorientációs szög négy szinten (ψ : 0°, 45°, 90°, 135°), a fogásmélység (a_p : 1 mm, 2 mm), az előtolás (f : 0,05 mm, 0,15 mm) és a fogások száma (i : 1, 2) két szinten. Állandó paraméterek voltak: a forgácsolási sebesség (100 m/min), a fogásszélesség (6 mm) és a marási technológia (ellenirányú marás). A fogásszélesség állandóan tartása érdekében a munkadarabok a kísérlet előtt kontúr marva lettek. A szerszám nem tudott az anyagba süllyedni, emiatt a kísérletek sorrendje kötött volt.

A kísérleti megmunkálás egy Kondia B640 háromtengelyes megmunkálóközponton lett elvégezve egy Tivoly P652 z2 Ø12 Alcrona bevonatú szerszámmal. A méretre vágott UD-CFRP munkadarabokat egy befogó készülék tartotta a helyén a megmunkálás során (1.a ábra). A kísérlet során száraz megmunkálás volt, és a létrejövő por egy Nilfisk GB733 típusú ipari porszívóval lett eltávolítva. A befogó készülék egy KISTLER 9257B háromkomponenses erőmérő cellára volt helyezve, amellyel a forgácsolási erő lett mérve egy többcsatornás KISTLER 5070 töltéserősítő, két National Instruments USB-4431 adatgyűjtő kártya és egy LabVIEW program segítségével. A mintavételezési frekvencia úgy lett megválasztva, hogy a szerszám forgása közben 5°-ként vételezzon adatot. A forgácsolt felületi minőség kiértékeléséhez egy Mitutoyo SJ-400 surftest felülettapintó, egy Dina-Lite Edge Digital Microscope AF4515ZT típusú digitális mikroszkóp és egy Jeol JSM-6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) lett felhasználva. A kísérleti elrendezést és a kiértékelés során használt eszközöket mutatja a 1. ábra.

A forgácsolási erő adatok kiértékelése során a nyers adatok egy Butter-worth féle aluláteresztő szűrő segítségével lettek szűrve, majd a komponensek négyzetösszegének gyökei lettek átlagolva. Az átlagolás a 100 legnagyobb erőérték alapján lett meghatározva. A felületi minőség minden beállítás esetén ötször lett lemérve, majd ezek átlaga lett számításba véve. A SEM felvételek négy beállítás esetén lettek elkészítve, ahol csak a szálorientációs szög különbözött a megvizsgált munkadarabok esetén ($a_p = 1$ mm, $f = 0,05$ mm, $i = 2$).

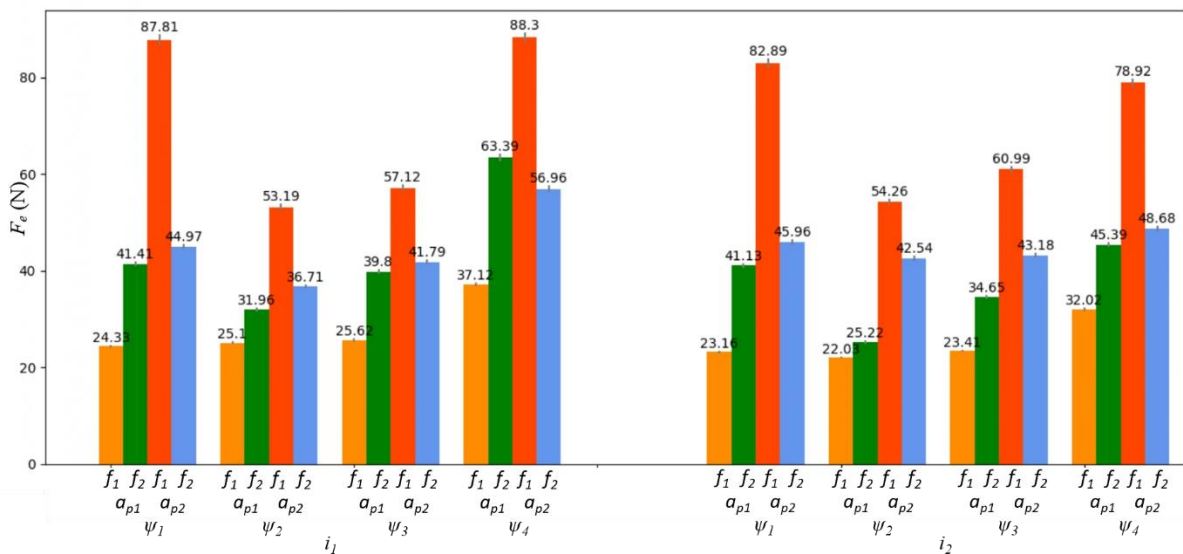


1. ábra Kísérleti és mérési környezetek, (a) megmunkálási környezet, (b) felülettapintó, (c) pásztázó elektronmikroszkóp (SEM), (d) digitális mikroszkóp

3. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

3.1 Forgácsolási erők

A forgácsolási erő igen változatos volt a különböző beállítások esetén, ahogy a 2. ábrán is látszik. A forgácsolási erő nagyságára a legszignifikánsabb hatással a fogásmélység és az előtolás van. Mindkettő faktor növelésével az egységnyi idő alatt kimunkálendő térfogatot nő, amellyel a forgácsolási erő is növekszik. A szálorientációs szögnek is van hatása a forgácsolási erőre, de csekélyebb mértékben. A 0° , illetve 135° szálirányok esetén a szálakkal szembe történt a megmunkálás, amely megnövelte a keletkező erőket. A fogások száma nem volt akkora hatással a forgácsolási erőre, mivel mindkét fogás esetén a fogásmélység azonos volt, mégis megfigyelhető, hogy a második fogás lemunkálása közben némivel kisebb erők keletkeztek. Ez azzal magyarázható, hogy a munkadarabok gyártása és befogása közben nem lehetett garantálni az egységes fogásmélységet a megmunkálás során, viszont amikor a második fogással kezdett forgácsolni a gép sokkal pontosabb fogásmélységet tudott kimunkálni. Ezen kívül feltételezhető, hogy az első fogás közben már kihúzódtak szálak, és emiatt a második fogás már sokkal kisebb erővel tudta megmunkálni a munkadarabot.

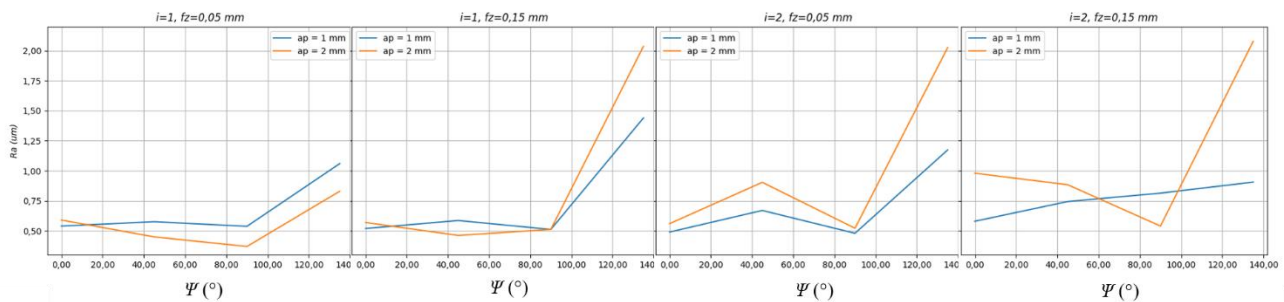


2. ábra Forgácsolási eredő erő beállításonként
 $(f_1 = 0,05 \text{ mm}; f_2 = 0,15 \text{ mm}; a_{p1} = 1 \text{ mm}; a_{p2} = 2 \text{ mm};$
 $\psi_1 = 0^\circ; \psi_2 = 45^\circ; \psi_3 = 90^\circ; \psi_4 = 135^\circ; i_1 = 1; i_2 = 2)$

A kísérleti eredményeket ANOVA számítás is alátámasztja, amelyet a 1. táblázat mutat.

3.2 Felületi minőség és integritás

A felületi érdesség vizsgálata alapján az látható (3. ábra), hogy csak a szálorientációs szögnek van szignifikáns hatása a kialakult felületi minőségre. Erre a jelenségre adhat magyarázatot a mátrix anyag elkenése. A megmunkálás során a szerszám homlokfelülete sokat érintkezett a munkadarabbal, és az így keletkezett hő meglágyította a mátrix anyagot, amely homogén felületet hagyott maga után. A szálorientációs szög tudta a legjobban hátráltatni ezt a kenődési folyamatot, amelyet a SEM felvételeken is meg lehet figyelni. A kísérleti eredményeket alátámasztja az ANOVA számítás, amely a 1. táblázatban olvasható.



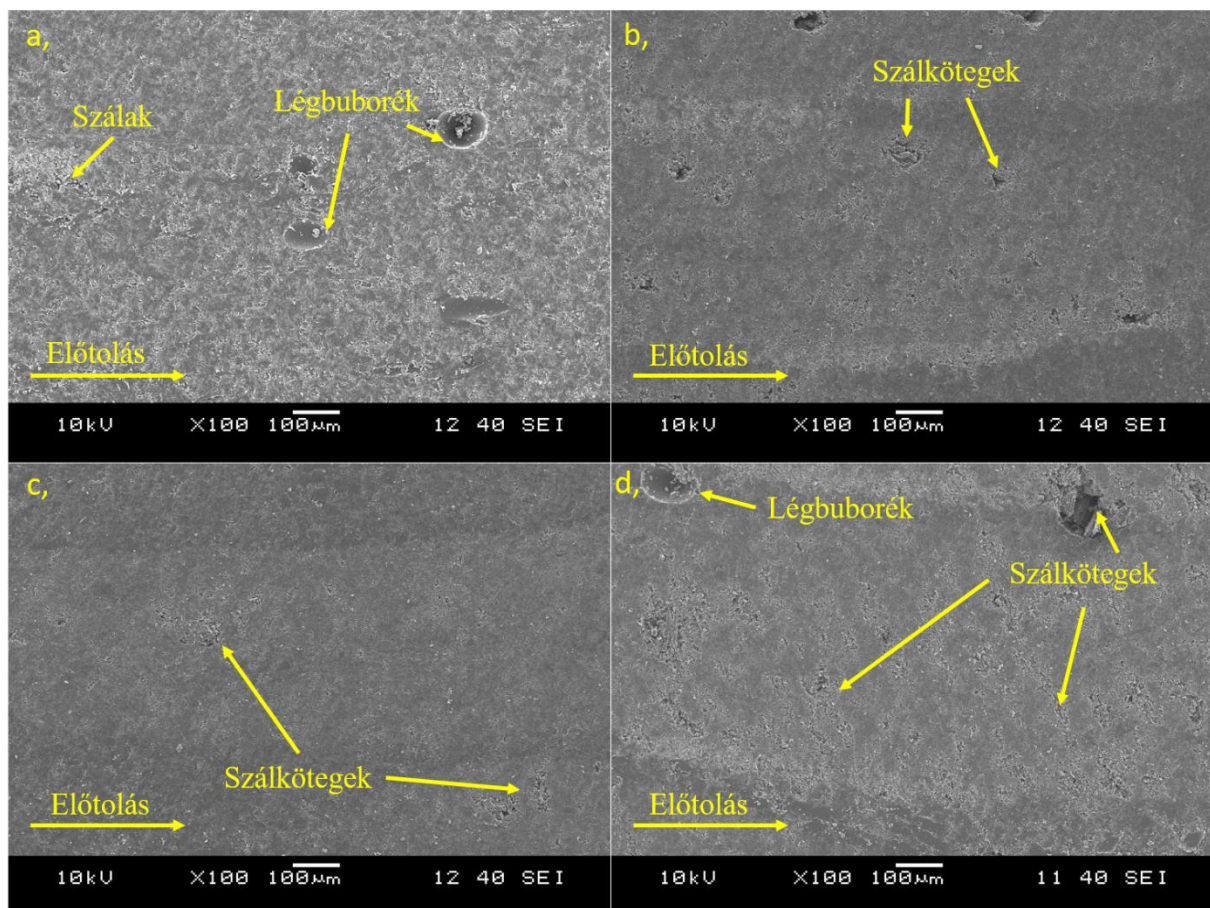
3. ábra Felületi érdesség

ANOVA táblázat a forgácsolási erőről, és a felületi érdességről

1. táblázat

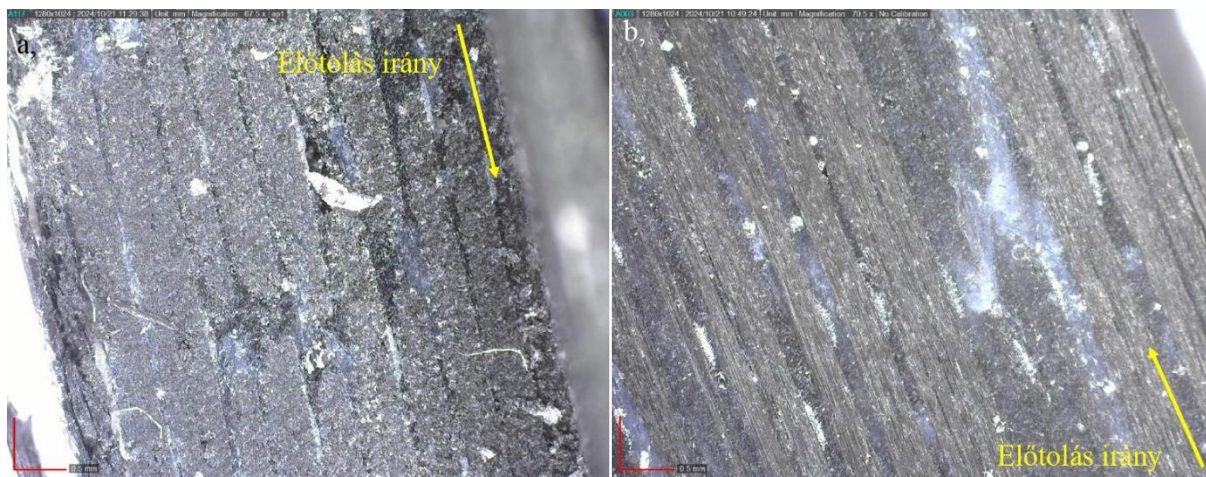
Hatás	Forgácsolási erő (F_e)					Felületi érdesség (R_a)				
	DF	SS	MS	F-érték	P-érték	DF	SS	MS	F-érték	P-érték
ψ	1	898,7	898,7	25,76	0	1	11,479	11,779	16,52	0
a_p	1	13943,1	13943,1	399,7	0	1	1,124	1,124	1,62	0,205
f	1	9276,1	9276,1	265,91	0	1	0,881	0,881	1,27	0,262
i	1	265,7	265,7	7,62	0,007	1	1,192	1,192	1,72	0,192
Hiba	84					148				
Összes	95					159				

A kialakult felületeket a degradálódott, és elkent mátrix anyag borítja be, amely homogén felületet képez a munkadarabokon, minden szálorientáció esetén megfigyelhető ez a 4. ábrán. A 0° , illetve a 90° szálorientációk esetén a szálak kihúzódása kevésbé volt jelen, így a felületből kiálló szálak nem hátráltatták a mátrix anyag elkenését, így jó minőségű felület alakulhatott ki (4.a,c ábra). A 45° szálorientáció esetén a megmunkálása során a kihúzott szálakat a szerszám vissza tudta hajlítani a felületbe, amely kevésbé hátráltatta a kenődési folyamatot, de így is rosszabb felületi minőség alakult ki, mint az előző két esetben (4.b ábra). A legrosszabb felületi minőséget egyértelműen a 135° szálorientáció alakította, ahol a szerszámmal szembe álló szálak nagyban hátráltatták a kenődési folyamatot, és a homogén felület kialakulását. Ebben az utolsó esetben nem csak szálak, hanem egész szálkötegek szakadtak ki a munkadarabból, amely szintén hátrányosan hatott a felületi minőségre (4.d ábra).



4. ábra Pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvételek a reprezentatív felületekről, (a) $\psi = 0^\circ$, (b) $\psi = 45^\circ$, (c) $\psi = 90^\circ$, (d) $\psi = 135^\circ$

A digitális mikroszkóppal készített képek alapján is megfigyelhető, hogy a szálorientációs szög határozza meg legjobban a kialakult felületi minőséget. Az 5. ábra a felületi érdesség mérés által (R_a alapján) meghatározott legrosszabb (5.a ábra), illetve legjobb felületeket (5.b ábra) mutatja. Ezen az ábrán megfigyelhető, hogy a szálak, vagy akár szálkötegek kihúzódnak a felületet, így kedvezőtlenebb felületi minőséget kialakítva a munkadarabon.



5. ábra Digitális mikroszkóppal készített képek (a) $\psi = 135^\circ$; $a_p = 2 \text{ mm}$; $f = 0,15 \text{ mm}$; $i = 2$,
(b) $\psi = 0$; $a_p = 1 \text{ mm}$; $f = 0,05 \text{ mm}$; $i = 1$

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az UD-CFRP munkadarabok kísérletek előtti előkészítése fontos szerepet játszik a névleges forgácsvastagság állandóan tartása érdekében. A kutatás a síkmarás hatásait vizsgálta a munkadarabok felületi minőségére, amely egy gazdaságos előkészítést tud nyújtani. A kutatás során a forgácsolási erő is mérve lett, így mélyebben lehetett vizsgálni a folyamat közeben létrejövő mechanizmusokat. A forgácsolási erőre szignifikáns hatással bír a fogásmélység (a_p) és az előtolás (f), ezen kívül kisebb hatással van a szálorientációs szög (ψ) és a fogások száma (i). A kutatás a felületi minőséget a felületi érdesség mérésével határozta meg, amely mérések alapján csak a szálorientációs szögnek (ψ) van szignifikáns hatása. A felületi integritás vizsgálata egy pásztázó elektronmikroszkóp segítségével lett elemelve, amely képek alapján megfigyelhető, hogy a felületet kialakító fő mechanizmus a mátrix anyag felmelegedése okozta kenés. Ezt a folyamatot leginkább a szálorientációs szög (ψ) befolyásolta, ahol a szálak vagy akár szálkötegek kihúzódnak a mátrix anyag elkenését, így kevesébe homogén felületet létrehozva a munkadarabon. A felületi érdesség mérési eredményei is a mátrix anyag elkenésével magyarázható. A kutatás hozzájárult egy gazdaságos UD-CFRP felület előkészítő eljárás mélyebb megértéséhez, amellyel könnyebben tudunk felületeket előkészíteni vagy munkadarabokat újra felhasználni kutatási célokra.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051, a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott EKÖP-24-4-II-BME-157 és TKP-9-8/PALY-2021 számú támogatásnak

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [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] Czvikovszky, Tibor ;Nagy, Péter ; Gaál, János (2013): A polimertechnika alapjai. BME Gépészmérnöki Kar, Budapest

- [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] HINTZE, WOLFGANG ; HARTMANN, DIRK: Modeling of Delamination During Milling of Unidirectional CFRP. In: *Procedia CIRP* Bd. 8 (2013), S. 444–449
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [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