

Szénsszállal erősített polimer kompozitok többtengelyes élmarási technológiájának fejlesztése és kísérleti vizsgálata

Development and experimental investigation of multi-axis edge-trimming technology of carbon fibre reinforced polymer composites

TIMA Tamás Sándor¹, MAGYAR Gergely¹, Dr. GEIER Norbert¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Abstract

Several challenges arise when edge-trimming carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites, such as the formation of burrs and delamination. In industry, appropriate quality CFRP shape characteristics are created by using tools with special geometry and optimized process parameters. The main goal of our research was the development of a multi-axis edge milling technology that can produce high-quality geometrical features even with the use of traditional helical milling tools. We compared the quality of the edges processed with the innovative milling cycle to the quality of the edges made with a traditional technology. The edge-trimming experiments were performed with a single-edged solid carbide milling tool with a helix angle of 0°. The machined edges were examined with an Olympus SZX16 stereo microscope. The images were evaluated with digital image processing. The results show that the newly developed multi-axis edge milling technology is a relevant alternative to machining with a special geometry edge milling tool.

Keywords: CFRP; Machining; Edge-trimming; Multi-axis milling; Burr

Kivonat

A szénsszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok élmarásakor több kihívás is felmerül, mint például a jelentős sorja és delamináció képződés. Az iparban speciális geometriájú szerszámok és optimalizált folyamatparaméterek alkalmazásával hozzák létre a megfelelő minőségű CFRP alaksajátosságokat. A kutatásunk fő célja egy olyan többtengelyes élmarási technológia fejlesztése volt, amely hagyományos marószerszám alkalmazásával is megfelelő minőségű alaksajátosságokat képes készíteni. Az újszerű maróciklussal megmunkált élek minőségét hagyományos technológiával készített élek minőségével hasonlítottuk össze. Az élmarási kísérleteket egy egyélű 0°-os horonyszögű tömör keményfém marószerszámmal végeztük el. A forgácsolt éleket egy Olympus SZX16 típusú sztereomikroszkóppal vizsgáltuk meg, majd digitális képfeldolgozással értékeltük ki a felvételeket. Az eredmények azt mutatják, hogy az új fejlesztésű többtengelyes élmaró technológia releváns alternatívája a speciális geometriájú élmarószerszámmal végzett forgácsolásnak.

Kulcsszavak: CFRP; forgácsolás; élmarás; többtengelyes marás; Sorja

1. Bevezetés

A szénsszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok anyagokat egyre szélesebb körben alkalmazzák a repülő-, hadi- és járműiparban [8], hiszen kis sűrűségük mellett nagy mechanikai szilárdsággal rendelkeznek az erősítő szálak irányában [4]. Ezeket az anyagokat szénsszál erősítőszálak és jellemzően térhálós polimer mátrixanyag építi fel. Az iparban gyakran laminálással állítják elő a közel kész geometriájú CFRP munkadarabot [7]. Azonban a laminálás során a szűk tűrésű lapok előállítására nehézkes, ezért forgácsolási megmunkálás szükséges a megfelelő geometria kialakításához. Emellett a CFRP kompozit lemez külső részei nem rendelkeznek azokkal a mechanikai tulajdonságokkal, mint amivel a munkadarab belső része bír, ezért a nem megfelelő külső részek élmarására van szükség [3].

A szénzál erősítésű polimer kompozitok forgácsolása során azonban több kihívás is felmerül. Ilyen megoldandó kihívás a fokozott sorjaképződés, a laminált rétegek elválása, azaz a delamináció, valamint a szénzálak abrazív hatása miatt a szerszám fokozott kopása [6].

Az iparban manapság speciális szerszámokkal munkálják meg a kompozit lapokat. Ilyen szerszámokat hasonlítottak össze C. R. Cunningham és munkatársai [1] azt vizsgálva, hogy az úgynevezett méhsejtmaró vagy a kompressziós hatást kifejtő marószerszám csökkenti-e jobban a delamináció mértékét. A kutatás eredményeképp megállapították, hogy a kompressziós hatást kifejtő marószerszám 49,9 %-kal csökkentette a delamináció mértékét, valamint a szerszámot is kisebb mértékben koptatta a CFRP kompozit.

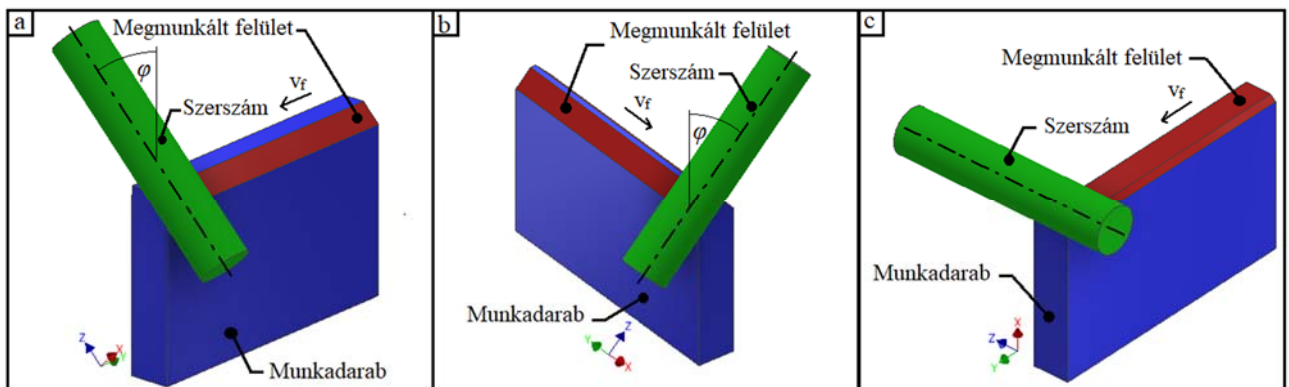
Az imbolygó marás technológiával elkészített furatok kisebb mértékű delaminációt és sorjanagyságot eredményeznek, ezt bizonyították be Pereszlai Csongor és munkatársai [2]. A „woble milling” furatkészítési technológia három lépésből épül fel. Első lépésben egy, a névlegesnél kisebb furat kerül elkészítésre hagyományos furatmegmunkálási eljárással, egy fűrő-maró szerszámmal. A második lépésben a fűrő-maró szerszámot bedöntve forgatjuk körbe a furat tengelye körül. Végül a fűrő-maró szerszám palástfelületével kialakítják a névleges furatnagyságot. A kutatás során bebizonyosodott, hogy az imbolygó marással jobb minőségű furat készíthető, mint hagyományos furatmegmunkálással.

Az ipari gyakorlatban speciális szerszámokkal munkálják meg a CFRP kompozit éleit. Ezért jelen kutatásunk fő célja egy olyan élmegmunkálási technológia kifejlesztése, amely alkalmazásával hagyományos marószerszámmal is megfelelő minőségben megmunkálhatóak legyenek a CFRP kompozit élei, az imbolygó marási technológia analógiáján.

2. Kifejlesztett újszerű megmunkálási technológia

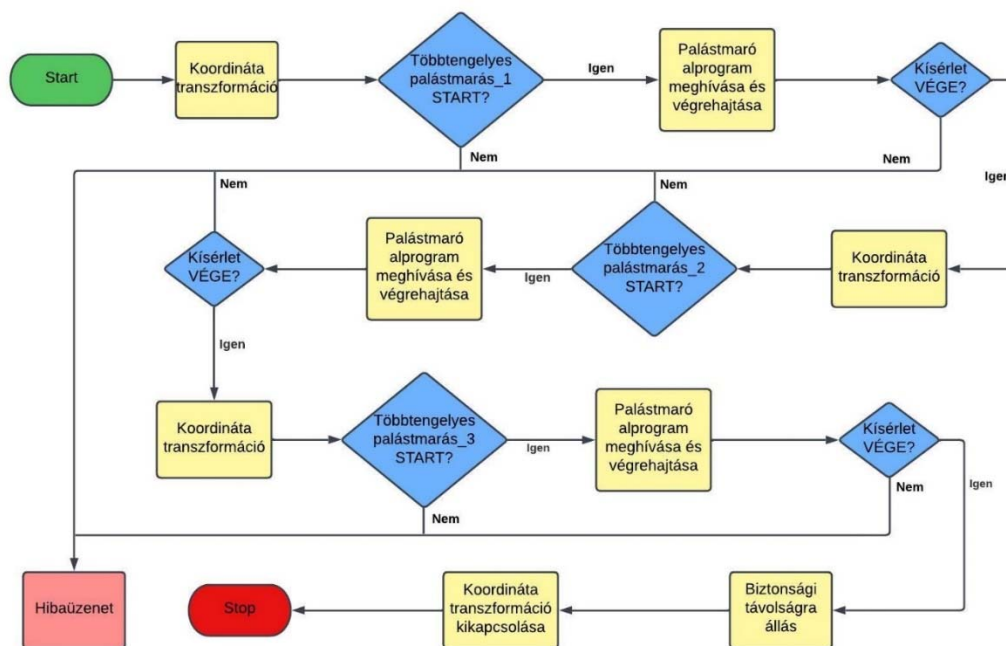
Annak érdekében, hogy a CFRP kompozit éleit egy hagyományos szármaróval is kiváló minőségben forgácsolni tudjuk, kifejlesztettünk egy újfajta forgácsolási technológiát, amelyet többtengelyes palástmarásnak neveztünk el. A többtengelyes palástmaró technológiával három fő lépésben készül el a kompozit végleges élfelülete. Az első lépésben a szerszám adott szögben (φ) bedöntve munkálja meg a CFRP kompozit élét (1.a. ábra), hogy a szerszám kompressziós hatást fejtsen ki a munkadarabra, ezáltal csökkentve a forgácsolásindukált geometriai hibák létrejöttének kockázatát a névleges élkontúron. A második lépésben a szerszámot az ellenkező irányba döntjük be (1.b. ábra), így az él másik oldalára is elkészül egy letérés. Végül, a harmadik lépésben, a lemez-oldalfelület normálirányára merőlegesen munkáljuk meg a CFRP kompozit élét a szerszám palástfelületével (1.c. ábra), hogy eltávolítsuk a megmaradt ráhagyást.

A többtengelyes palástmarás implementálását CNC forgácsolási környezetbe három egymásba ágyazott indexelt többtengelyes palástmaró ciklussal oldottuk meg. A többtengelyes palástmaró ciklus egyszerűsített blokkdiagramja az 2. ábrán látható.



1. ábra

Többtengelyes palástmarás szemléltetése: (a) első lépésben a szerszám adott szögben (φ) bedöntve munkálja meg a CFRP kompozit élét, (b) második lépésben a szerszámot a másik irányba döntjük be, (c) a harmadik lépésben, a lemez-oldalfelület normálirányára merőlegesen munkáljuk meg a CFRP kompozit élét a szerszám palástfelületével



2. ábra
Többtengelyes palástmarás blokkdiagramja

3. Kísérleti körülmények

A hagyományos palástmaró és a többtengelyes palástmaró technológia összehasonlítására Central Composite Circumscribed típusú kísérletet terveztünk a Minitab szoftverrel. A kísérleti faktoroknak az előtoló sebességet (v_f) és a fogásszélességet (a_e), valamint a megmunkálási technológiát választottuk (T). Az előtoló sebességet és a fogásszélességet 5-5 szinten, míg a megmunkálási technológiát 2 szinten változtattuk. A kísérleti faktorokat és szinteket a 1. táblázat foglalja össze. A faktortér középpontjában a kísérleteket ötször megismételtük a reprodukálhatósági jellemzők meghatározására. A szisztematikus hibák kezelése miatt a kísérleteket véletlenszerű sorrendben hajtottuk végre.

Kísérleti faktorok és faktorszintek

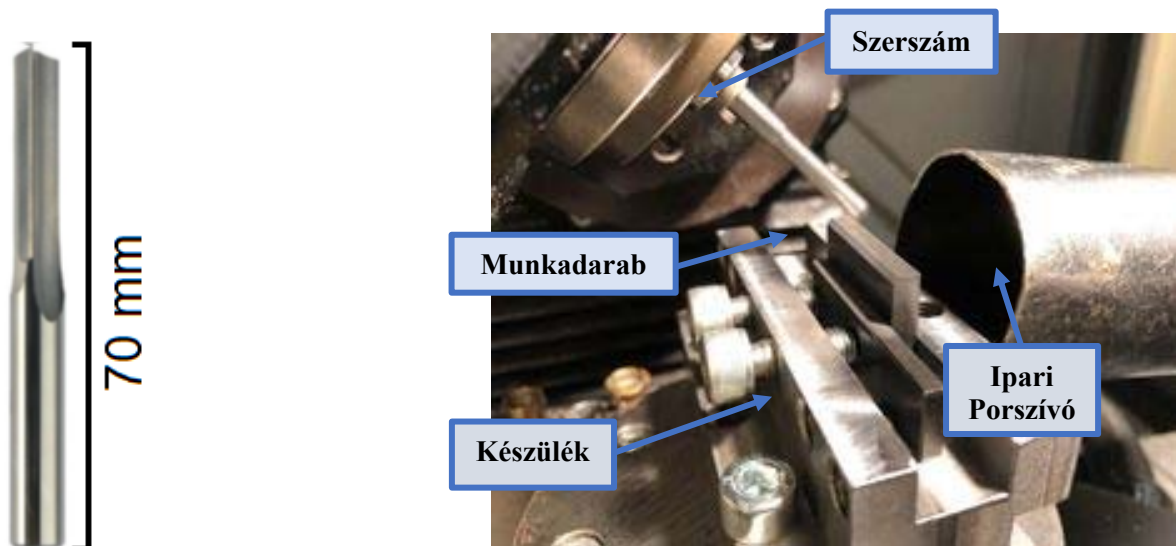
1. táblázat

Faktorok	Jelölés	Faktorszintek				
		1	2	3	4	5
Előtoló sebesség	v_f (m/min)	100	143,934	250,000	356,066	400,000
Fogásszélesség	a_e (mm)	0,3	0,343	0,450	0,556	0,600
Megmunkálási technológia	T (-)	palástmarás	többtengelyes palástmarás			

A kísérletek elvégzése során a forgácsolási sebességet ($v_c = 113,04$ m/min), a rögzítő csavarok meghúzási nyomatékát ($M = 3$ Nm), a szerszám hosszkorrekcióját ($H = 47,046$ mm) és a bedöntési szöget ($\varphi = 45^\circ$) rögzítettük. A szénszálak irányítottsága merőleges volt a szerszám előtoló sebesség irányára. Minden különálló ráhagyási alakzatot egy fogásban távolítottunk el. A forgácsolás során hűtő-kenő folyadékot nem alkalmaztunk.

Az élmarási kísérleteket egyirányban szénszállal erősített polimer (UD-CFRP) kompoziton végeztük el. A felhasznált CFRP lemez anyagtulajdonságait [8] publikáció részletezi. A kompozit lemezeket 35x22,2x5,3 mm nagyságúra daraboltuk le egy Mutronic Diadisc 5200 típusú darabológéppel.

A forgácsoló kísérleteket egy VHTC-130 LINEAR típusú 5 tengelyes megmunkáló központon végeztük el. A megmunkáláshoz egy THOMAS 23N1106 típusú, egyélű 0° -os horonyszögű bevonat nélküli 6 mm átmérőjű keményfém szerszámot alkalmaztunk (3. ábra). A kompozit befogásához egy speciális készüléket használtunk (4. ábra), befogásonként adott meghúzási nyomatékkal (M). A szénszálak kiváló áramvezetése miatt rövidzárlatot okozhatnak a szerszámgépben. Ezért elszívást kellett alkalmaznunk, ehhez egy Nilfisk GB733 típusú ipari porszívót használtunk. A megmunkálási környezet a 4. ábrán látható.



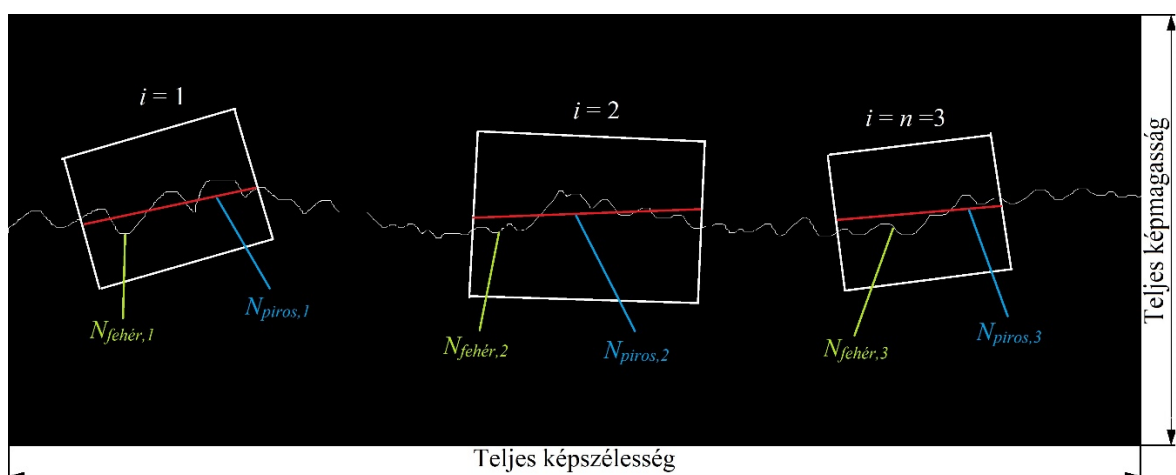
3. ábra
Forgácsoló szerszám

4. ábra
Mégmunkáló környezet

A forgácsoló kísérletek után egy OLYMPUS SZX16 típusú sztereomikroszkóppal vizsgáltuk meg a munkadarabok éleit és 20-szorosan nagyított, 2448x1920 pixel felbontásban készítettünk fényképeket azokról. A sztereomikroszkóp segítségével készített fényképeket először binarizáltuk, majd meghatároztuk a binarizált képeken a fehér képpontok (azaz élkontúr pontok) helyzetét és számát. Figyelembe véve, hogy a fotózott él nem volt teljes mértékben párhuzamos a kép szélével, a névleges (ideális) élkontúr hosszát meg kellett határozni annak érdekében, hogy a különbözően pozicionált kompozitokról készült binarizált fényképek összevethetőek legyenek egymással. A fehér képpontokra legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztettünk (piros egyenes) az 5. ábrán látható módon, amely egyenes hosszára fajlagosítva meghatároztuk a kompozit átlagos fajlagos élhosszát az (1) egyenlet alapján.

$$L_{fajl.átl.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_{fehér,i}}{N_{piros,i}} \quad (1)$$

Ahol $L_{fajl.átl.}$ (-) az átlagos fajlagos élhossz, $n=3$ ablakok száma, $N_{fehér,i}$ (pixel) a fehér képpontok száma, $N_{piros,i}$ (pixel) a piros képpontok száma.

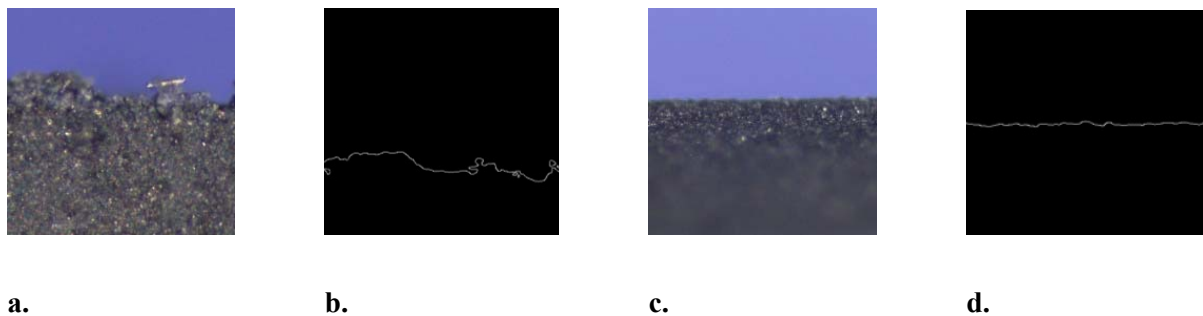


5. ábra
Kompenzálás szemléltetése

4. Erdemények és következtetések

Varianciaanalízis (ANOVA) alapján a kísérletek során változtatott előtoló sebesség és fogásszélesség faktoroknak 95 %-os szignifikancia szinten nem volt releváns hatásuk a kísérleti eredményekre. Mivel a kísérleti faktorok nem voltak szignifikánsak, ezért a fő- és keresztthatások nagysága nem értelmezhető.

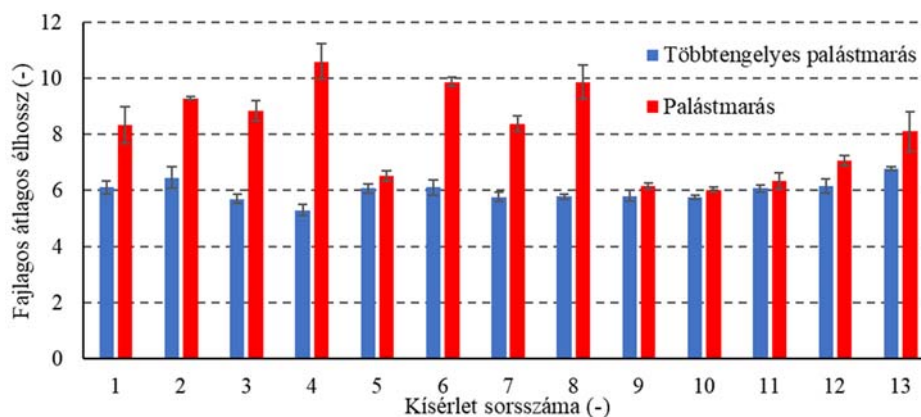
A sztereomikroszkóp által készített nyers és feldolgozott felvételek az 6. ábrán láthatóak. A többtengelyes palástmarás binarizált képe (6.d. ábra) szemmel láthatóan kevesebb fehér képpontot tartalmaz, mint az azonos előtolással és forgácsolási sebességgel készült palástmaró élről készült feldolgozott kép (6.b. ábra). Ez szemléletesen azt sugallja, hogy a forgácsolásindukált sorja nagysága kisebb a többtengelyes palástmaró technológiával készített éleken.



6. ábra

Készített felvételek és binarizált képek: (a) palástmarással megmunkált élről készített kép, (b) palástmarással megmunkált élről készített kép binarizált változata, (c) többtengelyes palástmarással megmunkált élről készített kép, (d) többtengelyes palástmarással megmunkált élről készített kép binarizált változata

A 7. ábrán láthatóak összefoglalva az egyes kísérletekhez tartozó átlagos fajlagos élhossz értékek. A sorja fajlagos nagyságát figyelembe véve egyértelműen kimutatható két technológia közti különbség. Ezen az ábrán látható, hogy a fajlagos átlagos élhosszak minden esetben nagyobb számértéket mutatnak a palástmarással végzett kísérletek esetében. Ezenfelül a többtengelyes palástmaró kísérletek fajlagos átlagos élhosszértékei kisebb mértékben ingadoztak. Ebből arra következtethetünk, hogy a kísérleti faktorok változtatása kisebb mértékben befolyásolta a kísérleti eredményeket a többtengelyes palástmarás esetén.



7. ábra

A két technológia összehasonlítása a fajlagos átlagos élhosszak alapján

Az eredmények azzal magyarázhatóak, hogy a többtengelyes palástmarás esetén a szerszámmal egy kompressziós hatást hozunk létre a kompozit lemez élén. Ennek következtében a laminált rétegek összepréselődnek, amelynek hatására kisebb mennyiségű sorja képződik, és a delamináció kialakulásának kockázatát is jelentősen csökkenthetjük.

A többtengelyes palástmarás további előnye, hogy elégséges egy hagyományos marószerszám alkalmazása a technológiához. Emellett, az alkalmazott szerszám horonyszöge sem befolyásolja feltételezhetően szignifikánsan a sorjaképződést, de ezt további vizsgálatokkal igazolni szükséges. Ezen túl, a

többtengelyes megmunkálás során egy műveletben elkészíthetők az élettörések, melyek nagy valószínűséggel javítják a CFRP alkatrészek szerelhetőségét és élettartamát [9].

A hátrányok közt megemlíthető, hogy a megmunkálás NC programja jóval bonyolultabb a többtengelyes palástmarás esetén, valamint a marás időtartama is hosszabb, ami többlet költségekkel járhat.

A kutatás során a delaminációt csak szemrevételezéssel vizsgáltuk meg, azonban a későbbiekben célszerű lenne számszerűsíteni a delamináció nagyságát. A szerszám bedöntési szög nagyságának hatását sem vizsgáltuk a kísérletek során, azonban későbbiek során ezen paraméter hatását és optimumát is szeretnénk kimérni.

Figyelembevéve, hogy a jelenlegi technológiai kidolgozás szintje nem teszi alkalmassá jelenleg a kifejlesztett többtengelyes palástmaró technológiát ipari környezetben való alkalmazásra, a jövőben ezt a többtengelyes palástmaró technológiát tovább kell fejleszteni annak érdekében, hogy az ipar számára közvetlenül alkalmazható legyen ipari robotok alkalmazásával.

5. Összefoglalás

A kutatás során mindenekelőtt megvizsgáltuk azokat a hazai és nemzetközi kutatásokat, amelyek CFRP kompozit élmegmunkálásával foglalkoznak. Megállapítottuk, hogy hagyományos szármaróval történő megmunkálásra még nem irányultak kutatások. Ezért kifejlesztettük a többtengelyes élmaró technológiát. Az új általunk fejlesztett technológia minősítésére kísérleteket terveztünk. A kísérletek során a többtengelyes palástmaró technológiát a palástmaró technológiával hasonlítottuk össze. A kísérletekről képeket készítettünk, melyeket binarizáltunk. A kísérletek alapján szemmel láthatóan kevesebb fehér képpontot tartalmaz a többtengelyes élmarással készült él binarizált képe. Ez szemléletesen azt sugallja, hogy a forgácsolásindukált sorja nagysága kisebb a többtengelyes palástmaró technológiával készített éleken. A névleges (ideális) élkontúr hosszát meg kellett határozni. A fehér képpontokra legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztettünk, amely egyenes hosszára fajlagosítva meghatároztuk a kompozit átlagos fajlagos élhosszát. A fajlagos átlagos élhosszak minden esetben nagyobb számértéket mutatnak a palástmarással végzett kísérletek esetében. Tehát a palástmarással készített kompozitok nagyobb sorjamennyiséget produkáltak.

Köszönetnyilvánítás

Ez a kutatás a Magyar Tudományos Akadémia által finanszírozott, BO/00508/22/6 számú Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és az Innovációs és Technológiai Minisztérium által finanszírozott Új Nemzeti Kiválóság Program ÚNKP-22-5-BME-327 számú Ösztöndíj támogatásával készült. Ez a kutatás részben a Kínai és Magyar tudományos és technológiai együttműködést ösztönző 2019-2.1.11-TÉT-2020-00203 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

Irodalmi hivatkozások

- [1] C. R. Cunningham, A. Shokrani, V. Dhokia, Edge trimming of carbon fibre reinforced plastic, *Procedia CIRP*, 2018, 77, 199-202.
- [2] Csongor Pereszlai, Norbert Geier, Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of CFRPs, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106, 3913–3930
- [3] J. Ahmad, *Machining of Polymer Composites*. Springer US, 2009.
- [4] N. Forintos, T. Czigany, Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review, *Composites Part B: Engineering*, 2019, 162, 331-343
- [5] Norbert Geier, J Paulo Davim, Tibor Szalay, Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: a review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 126.
- [6] Norbert Geier, Tibor Szalay, István Biró, Trochoid milling of carbon fibre-reinforced plastics (CFRP), *Procedia CIRP*, 77, 375-378.
- [7] S. Vigneshwaran, M. Uthayakumar, V. Arumugaprabu, Review on Machinability of Fiber Reinforced Polymers: A Drilling Approach, *Silicon*, 2018, 10, 2295–2305.
- [8] The Boeing company, 787 DREAMLINER BY DESIGN, <https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>, (Utolsó letöltés dátuma: 2023.02.19.).
- [9] Zhibo Song, Shizhao Ming, Tong Li, Kaifan Du, Caihua Zhou, Bo Wang, Improving the energy absorption capacity of square CFRP tubes with cutout by introducing chamfer, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 189.