

Szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok többtengelyes élmarási technológiájának vizsgálata forgácsolásindukált sorja és felületi érdesség szempontjából

Investigation of multi-axis edge trimming technology of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites in terms of machining-induced burr and surface roughness

TIMA Tamás Sándor¹, Dr. GEIER Norbert¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Abstract

Carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites are increasingly used in industrial environments primarily due to their high specific strength. The pre-production of CFRP composites usually does not reach the desired size- and shape tolerance, so machining is often necessary. However, several difficulties arise during the cutting of CFRPs, including the increased formation of cutting-induced burrs. In this study, we examined the previously developed multi-axis edge trimming technology, by varying the angle of tool tilting and the extent of the remaining chamfer. The cutting experiments were performed on a VHTC 5-axis machining center using a THOMAS 23N1106 single-edged, uncoated carbide milling tool with a helix angle of 0°. After the machining experiments, we took pictures of the finished edges with an OLYMPUS SZX16 stereomicroscope. After the microscopic examination, we measured the surface roughness of the workpieces with a Mitutoyo Surftest SJ-401 surface roughness tester and a KEYENCE VR 3-dimensional microscope. Based on the analysis of variance, it can be concluded that the effect of the tool tilting angle is significant, which should be chosen as large as possible for the avoiding burr, and as small as possible if the surface roughness is considered to be the optimisation parameter.

Keywords: CFRP, Machining, Edge trimming, Multi-axis, Burr, Surface roughness

Kivonat

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitokat egyre szélesebb körben alkalmazzák ipari környezetben elsősorban a nagy fajlagos szilárdságuk miatt. A CFRP kompozitok előgyártása legtöbbször nem éri el a kívánt méret- és alakműrészt, ezért forgácsoló megmunkálásra van szükség. A szénszállal erősített polimer kompozitok forgácsolása során azonban több nehézség is felmerül, többek között a forgácsolásindukált sorja fokozott képződése. A kutatásunk során egy korábban általunk kifejlesztett többtengelyes élmaró technológiát vizsgáltuk, a bedöntési szög és a maradék letörés mértékének változtatásával. A forgácsoló kísérleteket egy VHTC 5 tengelyes megmunkálóközponton végeztük, egy THOMAS 23N1106 típusú tömör, egyélű, bevonat nélküli, 0°-os spirálszöggel rendelkező keményfém marószerszámot alkalmazva. A forgácsolás után az elkészült élekről felvételeket készítettünk egy OLYMPUS SZX16 típusú sztereomikroszkóppal. A mikroszkópos vizsgálat után egy Mitutoyo Surftest SJ-401 típusú analóg felületi érdességmérővel, valamint egy KEYENCE VR series 3 dimenziós mikroszkóppal mértük le a munkadarabok felületi érdességét. A varianciaanalízis alapján megállapítható, hogy a bedöntési szög hatása szignifikáns. Amelyet a sorja szempontjából a lehető legnagyobbra kell választani, míg a felületi érdesség szempontjából a lehető legkisebbre.

Kulcsszavak: CFRP; Forgácsolás; Élmarás; Többtengelyes marás; Sorja, Felületi érdesség

1. BEVEZETÉS

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitokat széles körben alkalmazzák, hiszen a szénszálak irányában nagy szilárdsággal rendelkeznek kis sűrűségük mellett [3]. A CFRP kompozit anyagok gyorsan terjednek a csúcscategóriás iparágakban, mint a repülőgép-, gépjármű- és hadiipar [11]. Ezeket az anyagokat legtöbbször szénszál erősítőszálak és hőre keményedő polimer mátrixanyag alkotják. Az ipari környezetben a CFRP kompozit anyagokat közel kész geometriai alakra és méretre gyártják [10]. Azonban a CFRP kompozit

munkadarabba konstrukciósan tervezett furatok és szűk tűréssel rendelkező falfelületek egy műveletben történő gyártása meglehetősen nehézkes, ezért forgácsoló megmunkálásra van szükség a megfelelő alak és geometria előállításához [8]. Emellett az alakra közel készre gyártott CFRP kompozitok külső felületei nem rendelkeznek olyan mechanikai és geometriai tulajdonságokkal, mint az anyag belső része, így a külső részek eltávolítására van szükség [1].

A szénszállal erősített polimer kompozitok forgácsoló megmunkálása során azonban több kihívás is felmerül. Ilyen megoldandó probléma a delamináció megakadályozása, amely a laminált rétegek elválását jelenti, valamint a fokozott sorjaképződés elkerülése. Ezentúl a szénszálak koptató hatása miatt nagyobb mértékű szerszámkopásra is számítani kell [4].

Manapság az ipari környezetben speciális kompozitmaró szerszámmal munkálják meg a CFRP kompozitokat [5]. Ilyen speciális szerszámokat hasonlítottak össze kutatásuk során Cunningham és munkatársai [2]. A kísérleteik során egy úgynevezett méhsejtmarót hasonlítottak össze egy kompressziós marószerszámmal. Az eredményeik azt mutatják, hogy a kompressziós maró 49,9 %-kal csökkentette a delaminációt, valamint a forgácsoló szerszám is kisebb mértékben kopott a megmunkálás során. Az imbolygó marás technológiát vizsgálták Pereszlai és munkatársai [7]. Kutatásukból kiderül, hogy ezen technológiával a furatkészítés során csökkenthető a delamináció, valamint a sorjaképződés a hagyományos furatkészítéshez képest. Az imbolygó marás technológiához egy egyszerű kialakítású fúró-maró szerszám alkalmazása is elegendő.

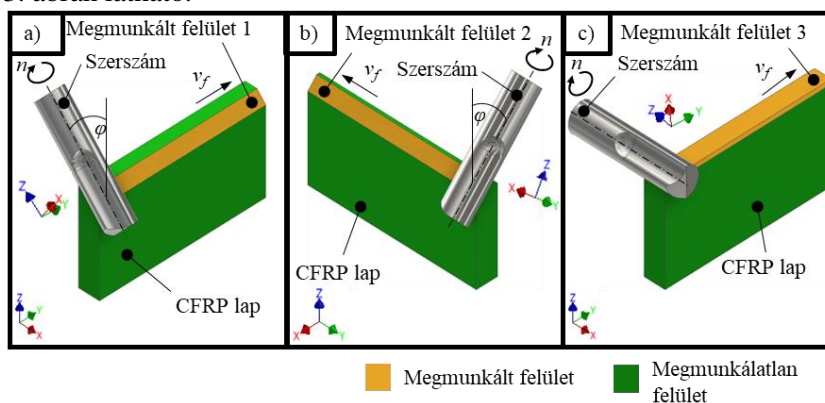
Az imbolygó marás analógiája alapján, annak lineáris kiterítésével fejlesztettük ki a többtengelyes élmaró technológiát [9]. Jelen kutatásunk fő célja ezen többtengelyes élmaró technológia vizsgálata a szerszám bedöntési szöge és a technológia során megadható maradó letörés szisztematikus variálásával.

2. TÖBBTENGELYES ÉLMARÓ TECHNOLÓGIA BEMUTATÁSA

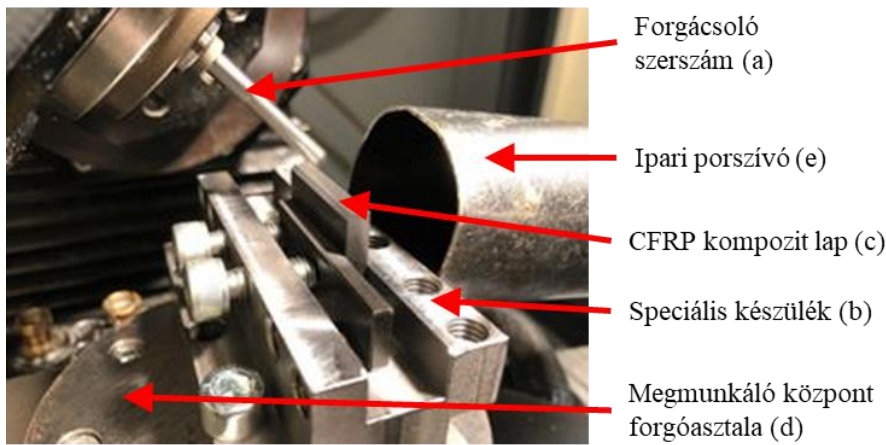
A többtengelyes élmaró technológia hagyományos marószerszám alkalmazásával, több tengely bevonásával alakítja ki a CFRP kompozit élét. A többtengelyes élmaró technológiával három fő lépésben készíthető el a kompozit végleges élfelülete. Az első lépésben a szerszám adott szögben (φ) bedöntve munkálja meg a CFRP kompozit élét (1.a ábra), hogy a szerszám kompressziós hatást fejtsen ki a munkadarabra (lásd 2. ábra), 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 letörés. Végül, a harmadik lépésben, a lemez-oldal felület normálirányára merőlegesen (lásd 2. ábra) munkáljuk meg a CFRP kompozit élét a szerszám palástfelületével (1.c ábra), a megmaradt ráhagyás eltávolítása érdekében.

A többtengelyes élmaró technológia bedöntési és fogásvételi paramétereinek megfelelő megválasztásával beállítható egy olyan letörés érték, amely a megmunkálás után a munkadarabon marad (lásd 2. ábra), ennek előnye, hogy nem szükséges egy újabb megmunkálási művelet a letörés elkészítéséhez. A 2. ábrán látható, hogy a forgácsolási erő megfelelő komponense a munkadarab belseje felé mutat, így elérve a laminált rétegek kompresszállását.

A többtengelyes élmaró technológia implementálását CNC forgácsolási környezetbe három egymásba ágyazott indexelt hagyományos palástmaró ciklussal oldottuk meg. A három palástmaró ciklus csak a szerszám Euler-szögekkel megadott bedöntésében különbözik. A többtengelyes élmaró technológia egyszerűsített blokkdiagramja az 3. ábrán látható.



1. ábra Többtengelyes megmunkálás ábrája: a) A munkadarab élének első megmunkálási fázisa meghatározott bedöntési szögben (φ), b) A munkadarab élének első megmunkálási fázisa meghatározott bedöntési szögben (φ), c) Az él végleges kialakítása



4. ábra Megmunkáló környezet



5. ábra Forgácsoló szerszám

A forgácsoló kísérletek után először egy OLYMPOS SZX16 típusú sztereomikroszkóppal vizsgáltuk meg a munkadarabok éleit. Ezen felül a mikroszkóppal 20-szoros nagyításban 1224x960 pixel felbontásban fényképeket készítettünk a munkadarabokról. Ezután egy KEYENCE VR 5000 Series típusú topográfus mikroszkóppal vizsgáltuk meg a munkadarabok felületét. A topográfus mikroszkóp beállítása után a berendezés automatikusan készítette el a felvételeket. A készült fájlokból ezután a topográfus mikroszkóp szoftverével értékeltük ki az adatokat. A kiértékelés során a felület teljes hosszán meg tudtuk határozni a felületi érdesség mérőszámokat, így átlagolásra nem volt szükség. A munkadarabok felületi érdességét egy Mitutoyo Surfest SJ-401 típusú felületi érdességmérővel is lemértük. Minden munkadarabot háromszori ismétléssel, majd a kiértékelés során átlagoltuk a mért értékeket.

3.2. Kiértékelési módszerek

A sztereomikroszkóppal elkészített fényképeket először binarizáltuk, majd meghatároztuk a binarizált képen található fehér képpontok (élkontúr pontok) számát és helyzetét. A kiértékelés során azonban figyelembe kellett vennünk, hogy a fényképek elkészítése során a sztereomikroszkóp megfelelő koordináta tengelye nem volt párhuzamos a névleges (ideális) élkontúrral. Ezért a fehér képpontokra legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztettünk (piros egyenes a 6. ábrán), ennek az egyenesnek a hosszával arányosítottuk az élkontúrt (fehér képpontok). Így összevethető eredményeket kaptunk. Ezen metódus alapján generált mérőszámot fajlagos átlagos élhossznak ($L_{f.á. (-)}$) neveztük el, számítása az (1) -es egyenlet alapján történik. Minden élről három fényképet készítettünk, ezért az egyes élekhez tartozó fajlagos átlagos élhosszakat munkadarabonként átlagoltuk.

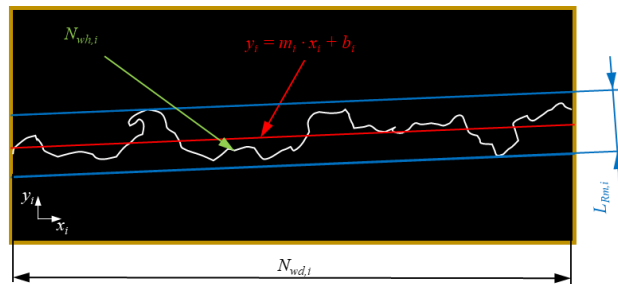
$$L_{f.á. (-)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{wh,i}}{\frac{N_{wd,i}}{\cos(\arctg(m_i))}} \right) \quad (1)$$

, ahol az $L_{f.á. (-)}$ a képpontok fajlagos átlagos élhossza, az $N_{wh,i}$ a képfeldolgozó algoritmus által meghatározott fehér képpontok száma, $N_{wd,i}$ a készített képek szélességei, m_i az illesztett egyenes meredeksége.

A maximális sorjanagyság ($L_{Rm. (-)}$) mérőszámot a felületi érdesség mérésénél használt maximális felületi érdesség mérőszám analógiáján határoztuk meg. A maximális sorjanagyság számításánál adott alaphosszon egyenlő távolságra határoztuk meg a maximális kiemelkedés és maximális mélyedés távolságát az alaponaltól, majd a kapott értékeket előjel nélkül összegeztem. Esetünkben az alapvonal a kompenzálás során illesztett egyenes volt. A maximális sorjanagyság számítása a (2) -es egyenlet alapján történt. A maximális sorjanagyságokat szintén munkadarabonként átlagoltuk. A sorját jellemző mérőszámokat szemlélteti a 6. számú ábra.

$$L_{Rm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\max [(y_{N_{wh,i,j}} - y_i) \cdot \cos(\arctg(m_i))] + |\min [(y_{N_{wh,i,j}} - y_i) \cdot \cos(\arctg(m_i))]| \right) \quad (2)$$

, ahol $L_{Rm. (-)}$ a maximális sorjanagyság, $y_{N_{wh,i,j}}$ a fehér képpontok „y” koordinátái, y_i az illesztett egyenes egyenlete, m_i az illesztett egyenes meredeksége.

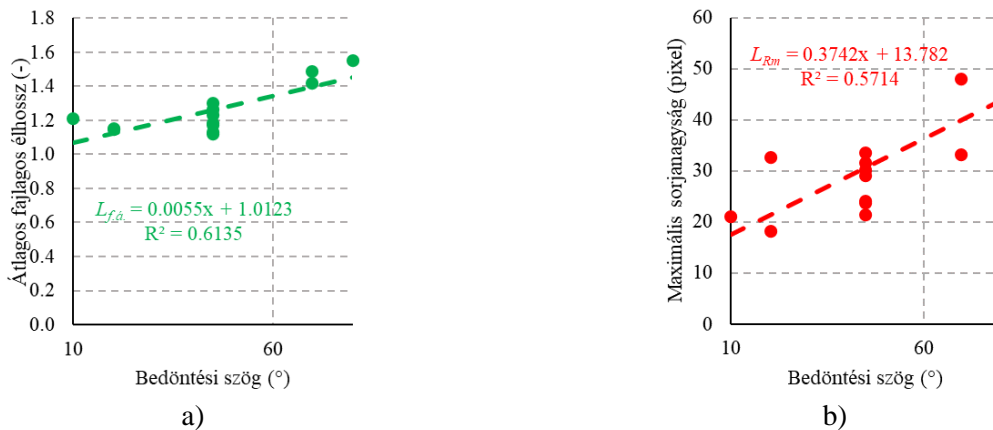


6. ábra Sorját jellemző mérőszámok szemléltetése

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

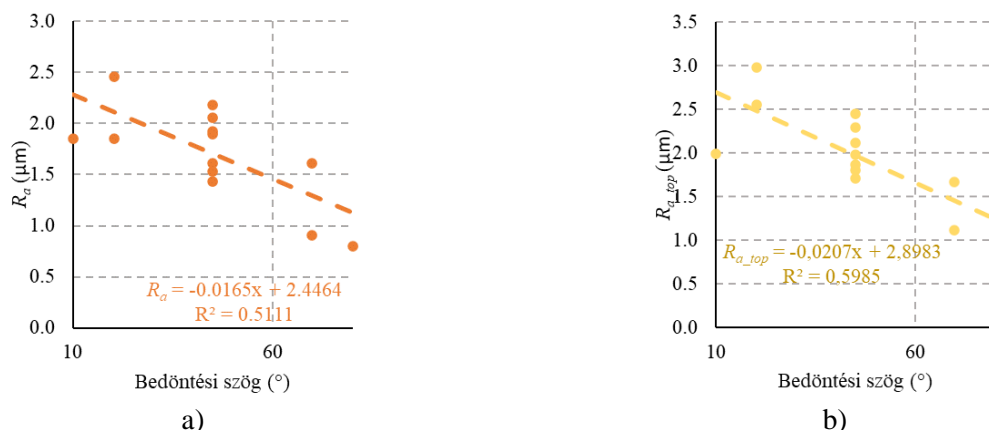
Varianciaanalízis (ANOVA) alapján megállapítható, hogy a felületi érdesség és a sorját jellemző mérőszámokra a bedöntési szög faktornak 95 %-os szignifikancia intervallum mellett szignifikáns hatása van. Azonban a maradó letörés faktornak nincs releváns hatása a mérőszámokra.

Az 7.a ábrán látható, hogy az átlagos fajlagos élhossz értékek növekednek a bedöntési szög növelésével. A maximális sorjanagyságot megvizsgálva hasonló, de fokozottabb növekedés figyelhető meg a bedöntési szög hatására (lásd 7.b ábra). A sorját jellemző mérőszámok növekedése a bedöntési szög függvényében azzal magyarázható, hogy a szerszám bedöntésének növelésével a forgácsolási erő axiális irányú komponense növekszik. Az axiális erő növekedésével nő a forgácsolásindukált sorja is.



7. ábra A sorjanagyság mérőszámok ábrázolva a bedöntési szög függvényében, a) átlagos fajlagos élhossz, b) maximális sorjanagyság

A 8.a ábrán látható, hogy az analóg felületi érdességmérő műszerrel mért eredmények csökkenő tendenciát mutatnak a bedöntési szög függvényében. A topográfus mikroszkóppal mért eredményeken is hasonló csökkenés figyelhető meg (lásd 8.b ábra). A felületi érdesség mérőszámok csökkenése a bedöntési szög függvényében azzal magyarázható, hogy a szerszám bedöntésének növelésével csökken az utolsó ráhagyási alakzat keresztmetszetének területe. Ennek következtében a szerszám kevesebb anyagmennyiséget távolít el, ami a szerszámrezgéssel áll kapcsolatban. Ezt a jelenséget a későbbi kutatások során szeretnénk kimutatni.



8. ábra A felületi érdességet jellemző mérőszámok a bedöntési szög függvényében, a) az átlagos felületi érdesség, b) az átlagos felületi érdesség topográfus vizsgálattal

A kapott eredményekből látható, hogy a szerszám bedöntési szögének megválasztása fontos a többtengelyes élmaró technológia alkalmazása során. Amennyiben a legkisebb forgácsolásindukált sorja elérése a cél a bedöntési szöget érdemes minél alacsonyabb értékre állítani. Azonban, ha a lehető legjobb minőségű felületi érdesség elérése a cél, akkor a bedöntési szöget a lehető legnagyobb értékre kell állítani. Így kompromisszumot kell kötni, hogy melyik paraméterre (sorjanagyság, felületi érdesség) kell az adott szempontok szerint optimalni a többtengelyes palástmaró technológiát. A többtengelyes élmaró technológia előnye, hogy elégséges egy hagyományos marószerszám alkalmazása. A szerszám horonyszöge azonban befolyásolhatja szignifikánsan a sorjaképződést, így ennek vizsgálatára további kísérletek szükségesek.

A technológiával ezen felül kialakítható a megmunkálás után is visszamaradó letörés, így nincs szükség egy újabb lépésben egy élettörő ciklus alkalmazására. Jelen kutatásból megállapítható, hogy a maradó letörés mértékének nincs szignifikáns hatása a forgácsolásindukált sorja és felületi érdesség mérőszámokra. Ezért a konstrukciós tervezés során nem szükséges a letörés értékének precíz megválasztása.

A technológia jelenlegi kidolgozási szintje jelenleg nem teszi alkalmassá az ipari környezetben való alkalmazásra. A jövőben szeretnénk a többtengelyes élmaró technológiát továbbfejleszteni olyan céllal, hogy a közvetlen ipari alkalmazásban is használható legyen, akár robotos megmunkálásra is.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során az előzőleg általunk kifejlesztett többtengelyes élmaró technológiát vizsgáltuk. A kutatáshoz kísérleteket dolgoztunk ki két paraméter (bedöntési szög (φ) és maradó letörés mértéke (c)) hatásának megállapítására. A kísérleti munkadarabokról a megmunkálás után fényképeket készítettünk, valamint lemértük azok felületi érdességeit. A fényképek egy képfeldolgozó algoritmuson mentek keresztül, amelyet lefuttatva egy binarizált képet kaptunk. A fehér képpontokra legkisebb négyzetek módszerével illesztettünk egyenest annak érdekében, hogy a fényképezésből adódó hibákat kiküszöböljük. Ezzel a módszerrel meg tudtuk állapítani a sorját jellemző mérőszámokat. A kutatás alapján megállapítható, hogy a többtengelyes élmaró technológia alkalmazásakor a bedöntési szög beállítása fontos, míg a maradó letörés nagysága tetszőlegesen beállítható.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

Ez a kutatás az Európai Unió által támogatott EPIC 739592 azonosítójú H2020 projekt támogatásnak köszönhetően valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] J. Ahmad, Introduction to Polymer Composites, in: J. Ahmad (Ed.), Machining of Polymer Composites, Springer US, Boston, MA, 2009: pp. 1–35.
- [2] C.R. Cunningham, A. Shokrani, V. Dhokia, Edge trimming of carbon fibre reinforced plastic, Procedia CIRP 77 (2018) 199–202.
- [3] 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 162 (2019) 331–343.
- [4] N. Geier, G. Póka, Á. Jacsó, C. Pereszlai, A method to predict drilling-induced burr occurrence in chopped carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites based on digital image processing, Composites Part B: Engineering 242 (2022) 110054.
- [5] N. Geier, J. Xu, D.I. Poór, J.H. Dege, J.P. Davim, A review on advanced cutting tools and technologies for edge trimming of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites, Composites Part B: Engineering 266 (2023) 111037.
- [6] G. Magyar, D. Károly, J. Xu, N. Geier, Analysis of drilling-induced geometrical damages in basalt and carbon fibre-reinforced polymer (BFRP and CFRP) composites, Int J Adv Manuf Technol 123 (2022) 357–372.
- [7] C. Pereszlai, N. Geier, Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of CFRPs, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 106 (2020).
- [8] R. Teti, Machining of Composite Materials, (n.d.).
- [9] T.S. Tima, G. Magyar, N. Geier, Szénszállal 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, Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT (2023) 466–471.
- [10] S. Vigneshwaran, M. Uthayakumar, V. Arumugaprabu, Review on Machinability of Fiber Reinforced Polymers: A Drilling Approach, Silicon 10 (2018) 2295–2305.
- [11] Boeing: 787 By Design, (n.d.).