

# SZÉNSZÁLLAL ERŐSÍTETT MŰANYAG (CFRP) FÚRÁSI VIZSGÁLATAI

## THE DRILLING INVESTIGATION OF CARBON FIBRE REINFORCED PLASTIC

*Horváth Richárd, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyag-és Gyártástudományi Intézet, e-mail: horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu*

### ÖSSZEFOGLALÁS

A szénszál erősítésű műanyagok felhasználása napjainkban nagymértékben növekszik. Köszönhető ez a számos kedvező mechanikai tulajdonságának valamint a szélesen elterjedt felhasználási területeinek. Ebben a publikációban egy forgácsolási kísérletre létrehozott (10 mm vastag) szénszál-erősítésű műanyag fúrás vizsgálatának eredménye kerül bemutatásra. A forgácsolási kísérleteket követően kiértékelés alá kerül a forgácsolási paraméterek ( $f$ , mm – előtolás;  $v_c$ , m/min – forgácsolási sebesség) hatása az  $F_z$ , N (axiális irányú) erőre és a furatok hengerességére. Olyan empirikus modell kerül bemutatásra mellyel az előtolás irányú erő ( $F_z$ ) becsülhető a vizsgált forgácsolási paraméter tartományon belül. Valamint a delamináció és a sorjaképződés vizsgálatának eredményei is elemzésre kerülnek.

### ABSTRACT

Nowadays using of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) is greatly increasing. It can be explained by the several good mechanical properties of it and the widespread uses (e.g.: aerospace industry, vehicle industry, sport equipment...). This article shows the results of the drilling investigation in case of CFRP. After the drilling experiments, there was investigated the effect of cutting parameters (such as  $f$ , mm – feed;  $v_c$ , m/min – cutting speed) on  $F_z$  (axial force) and cylindricity. An empirical model was constructed with which the axial force can be estimated in the range of investigated cutting parameters. Furthermore there were mentioned the results of the examination of the delamination and the burr too.

### 1. BEVEZETÉS

A szénszállal erősített műanyagok felhasználása napjainkban növekvő tendenciát mutat. Köszönhető ez a kiváló mechanikai tulajdonságainak. Ma az ipar számos területén megtalálhatóak ezek az anyagok (pl.: gépjárműgyártás, repülőgépipar, sport

eszközök...). Az ilyen anyagok befejező-, vagy készremunkálása, esetleg egy-egy felületük megmunkálása történhet forgácsolással. Számos tanulmány foglalkozik az ilyen anyagok forgácsolással történő megmunkálhatóságának vizsgálatával.

Voss és társai [1] munkájukban a hagyományos és az ún. orbitális fúrást hasonlították össze CFRP anyagok fúrásánál. Kísérleteikben gyémántbevonatos szerszámokat alkalmaztak. Vizsgálataikból megállapították, hogy a hagyományos fúrás technológia 3,3-szor nagyobb exiális erőt igényelt, mint az orbitális fúrás. Az orbitális fúrás erő igényei viszont a kezdeti kopás után állandó értéken maradtak. Kisebb delmainációt és kevesebb kiszakított szálakat okozott az orbitális fúrás technológiája.

Geier és Szalay [2] szintén hagyományos és ún. orbitális fúrás vizsgálatát végezték el CFRP anyagon. Válaszfüggvények módszerével empirikus modelleket konstruáltak az előtoló erő a felületi érdesség becslésére. Részletesen vizsgálták a forgácsolási paraméterek hatását, valamint a delamináció jelenségét. A fellépő erőhatások és a felületi érdesség minimalizálásával forgácsolási optimum pontot állapítottak meg.

Li és társai [3] szintén CFRP anyagok fúrását vizsgálta a szerszámkopás valamint a felületi érdesség vonalmenti és topográfia tekintetében. Az anyag anizotróp jellege miatt javasolják a 3D felületi érdességi vizsgálatokat.

Szintén szerszámkopással, forgácsolási hőmérséklettel és a felületi érdesség elemzésével foglalkozott Ramirez és társai [4] CFRP-s anyagok fúrásánál keményfém fúrók esetén. Vizsgálataikban megfigyelték, hogy a domináns kopásforma CFRP-s anyagoknál az abráziós kopás.

Gaugel és társai [5] részletesen vizsgálták kétféle CFRP anyag fúrásakor (bevonatolatlan keményfém szerszámmal) a delamináció és a szerszámkopás jelenségét. Korszerű képfeldolgozási technikákkal elemzik a delmainációt. (Furatok pontosságának, a delamináció vizsgálatának képi feldolgozását és

annak megközelítését mutatja be Caggiano és társai [6].) Azt a megállapítást teszik, hogy a furat méret pontosságát és körköröségét nem befolyásolja jelentősen a fúró kopottsági állapota. A szerszám kopás és az éllekerkedés változása között közel lineáris kapcsolatot találtak, viszont azt is megállapítják, hogy az éllekerkedés mérés (mint kopási jellemző) csak bevonatolatlan szerszámnál használható, bevonatos szerszámoknál nem. A delamináció és a szerszámkopás között szoros kapcsolatot találtak.

Merino-Pérez és társai [7] a forgácsoló sebesség hatását vizsgálták CFRP anyagok fúrásánál bevonatolatlan keményfém szerszámmal. Vizsgálataikban mérték és elemezték a forgácsolási erőt, nyomatékot és a hőmérsékletet különböző CFRP összetételeknél. Vizsgálataikból kiderült, hogy a hőre keményedő mátrix fajtája jelentős hatást gyakorolt mind a maximális erőre mind a nyomatékra.

Háromféle kúpszögű bevonatolatlan keményfém fúróval végeztek forgácsolási vizsgálatokat Feito és társai [8]. Válaszfüggvények módszerével kapcsolatot kerestek az előtolási erő és a forgácsolási paraméterek között új, hónolt, valamint kopott szerszám esetében. Kis előtolási erő eléréséhez a kisebb vágókúpszögű szerszámokat ajánlják.

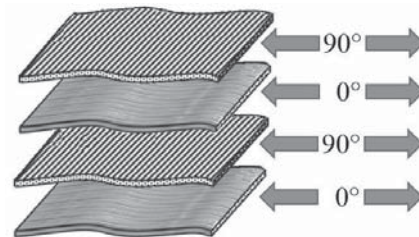
Repülőgépipar által felhasznált CFRP anyagok megmunkálását és annak vizsgálatát végezték el Çelik és társai [9] három féle összetételű SiAlON kerámia fúrókkal. Elektronmikroszkóp segítségével elemezték a szerszámok kopását, részletesen vizsgálták a delamináció és a szélkiszakadás jelenségét. Ők is megállapították, hogy a bekopási (néhány furat) után a fő kopási forma az abrázációs kopás. Egy másik tanulmányukban [10] négy féle SiAlON fúroszerszámot vizsgáltak. Ebben a munkájukban elemezték az előtoló erőt és a fúrás nyomatékigényét, valamint a szerszámok kopását, a delaminációt és a szélkiszakadásokat. Munkájukban megállapítják, hogy CFRP anyagok fúrása során a SiAlON fúrók viszonylag gyorsan kopnak. Már az első három furat alatt 80%-al nőtt az előtoló erő.

Ebben a tanulmányban 10 mm vastag CFRP fúrési vizsgálata kerül bemutatásra. Részletesen ismertetve forgácsolási paraméterek hatását az előtolási erő és a furatok hengerességére. Valamint a delamináció és a sorjaképződés (kiszakított szálak) vizsgálata is bemutatásra kerül.

## 2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

### 2.1 Kísérletben használt alapanyag

A kísérletben használt szénszál típusa Zoltek Panex 35, négyzetméter tömege: 400 g/m<sup>2</sup>. Rétegszám: 26. Mátrixanyagok: gyanta – Araltide LY1564, térhálósító – Aradur 3487. Gyártási technológia: vákuuminfüzió; fűtési sebesség 30 °C/óra; hőmérséklet: 55 °C; hőkezelés időtartama: 20 óra. A rétegek szálerendezése egymásra merőleges (1. ábra).



1. ábra. Rétegek szálerendezése a munkadarabban

### 2.2 Kísérletben használt szerszám

A kísérlethez felhasznált szerszám a DreamDrills termékcsalád Ø 10 mm-es karbonszállal erősített műanyagok (CFRP) forgácsolásához kifejlesztett gyémánt bevonatos fúrója (DI473100) [11]. A kísérletben használt szerszám, illetve a mért erő komponens irányát az 2. ábra tartalmazza.



2. ábra. Ø 10 mm fúró CFRP anyagokhoz (DreamDrills – DI473100)

### 2.3 Felhasznált szerszámgép, mérőeszközök

A fúrési kísérletek MAZAK VCN 410A-II típusú szerszámgépen lettek elvégezve (n = 40 – 12000 1/perc).

A fúrési kísérleteknél vizsgált  $F_z$  irányú erők mérésére egy piezoelektromos elven

működő KISTLER erőmérő rendszer lett használva. A Kistler 9257b típusú erőmérő platformot a munkadarab satu alatt rögzítve mérhetőek az előtolás ( $F_z$ ) irányú erők. Az erőmérő cellának a mérési tartománya  $F_x=F_y=-5\dots5$  kN, valamint  $F_z=-5\dots10$  kN [12]. Az erőmérő platformból jövő töltésmennyiség mely arányos az erővel (pC/N) Kistler 5019 erősítővel valamint DynoWare programmal lett kiértékelve. A furatok hengerességének mérése Mitutoyo, Crysta-Plus M 544 koordináta mérőgéppel történt.

#### 2.4 Mérés pontok meghatározása

A forgácsolási kísérleteknél használt forgácsolási paraméterek úgy lettek meghatározva, hogy azok lefedjék a katalógusban ajánlott adattartományt (ajánlott forgácsolási sebesség,  $v_c = 100\dots150$  m/min; valamint ajánlott előtolás,  $f = 0,03\dots0,07$  mm).

A fentiek tekintetében a forgácsolási paramétereket ( $v_c, f$ ) négy szinten ekvidisztáns értékkel változtatva adódik a 16 mérési pont, melyeket az 1. táblázat tartalmaz.

1. táblázat. Forgácsolási paraméterek valamint az  $F_z, N$  axiális erő és a hengeresség,  $t, mm$  értékek a kísérleti pontokban

Mérési pontok	$v_c, m/min$	$f, mm$	$F_z, N$
1	80	0,02	48
2	80	0,04	58
3	80	0,06	64
4	80	0,08	69
5	120	0,02	48
6	120	0,04	60
7	120	0,06	64
8	120	0,08	69
9	160	0,02	48
10	160	0,04	60
11	160	0,06	67
12	160	0,08	76
13	200	0,02	50
14	200	0,04	64
15	200	0,06	70
16	200	0,08	76

#### 2.5 Empirikus modell

Kereshető az összefüggés a független (bemenő,  $x_1, x_2$ ) változók és függő (kimenő,  $Y$ ) változó között:

$$Y = f(x_1, x_2) \quad (1)$$

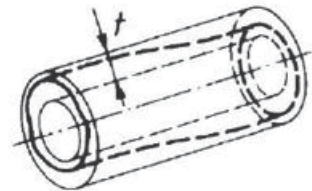
A válasz függvény az alábbi alakban kereshető:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_1^2 + a_4 \cdot x_2^2 + a_5 \cdot x_1 \cdot x_2 + \varepsilon \quad (2)$$

ahol  $Y$  – kimenő függő változó,  $x_1, x_2$  – bemenő paraméter,  $a_0, a_1, \dots, a_5$  – számított koefficiensek,  $\varepsilon$  – egyenlet hibája.

#### 2.6 Hengeresség mérésének módszere

A furatok geometriai pontossága igen fontos paraméter. Minden egyes kísérleti pontban kiértékelésre került a furatok hengerességi vizsgálata. A hengeresség nagysága az két egymástól  $t$  távolságra lévő, közös tengelyű hengerfelület, amelyek között a valóságos felület elhelyezkedik (3. ábra).



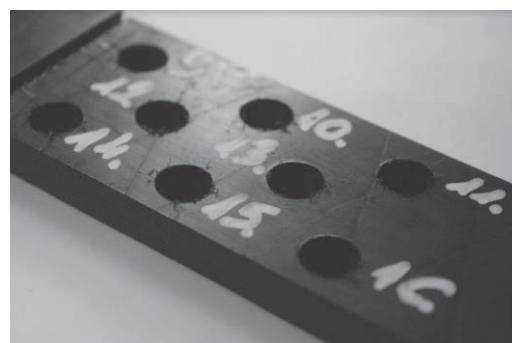
3. ábra. Hengeresség értelmezése

A hengeresség mérése a köralakvizsgálatra vezethető vissza. A hengerességet több, meghatározott sűrűséggel végzett köralakméréssel lehet meghatározni. A körök a legkisebb négyzetek (ún. Gauss módszer) módszerével lettek meghatározva nyolc mérési pontból.

### 3. EREDMÉNYEK

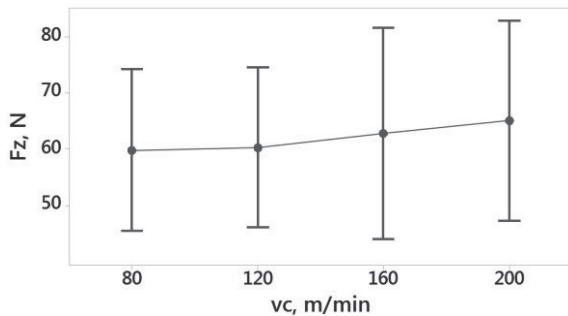
#### 3.1 Axiális erő ( $F_z$ ) értékeinek és forgácsolási paraméterek hatásának vizsgálata

A forgácsolási kísérletek egyik munkadarabját mutatja az (4. ábra).



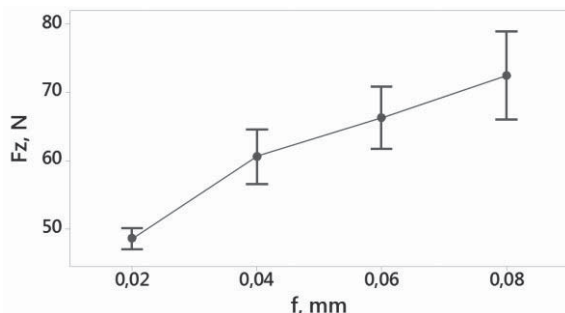
4. ábra. CFRP munkadarab fúrasi kísérletek után

A fúrás közben mért  $F_z$  erőértékek (1. táblázat) változását mutatja 5. és 6. ábra. Az 5. ábrán az azonos forgácsoló sebességhez tartozó  $F_z$  erő értékek átlaga szerepel. Az ábrán látszik, hogy a forgácsoló sebességnek nincs hatása az axiális,  $F_z$  irányú erő komponensre.



5. ábra. Forgácsolási sebesség hatása az axiális erőre

A 6. ábra az azonos előtolásokhoz tartozó  $F_z$  értékek átlagát mutatja. Jól látszik, hogy az előtolásnak nagy hatása van az axiális erőre. Az előtolás növelésével növekszik az előtolási irányú erők értéke.



6. ábra. Az előtolás hatása az axiális erőre

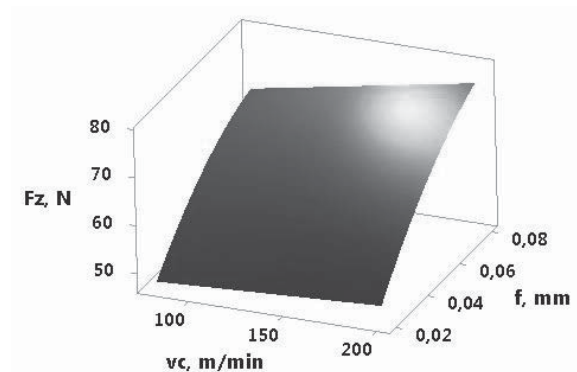
### 3.2 Empirikus modell létrehozása

Célszerű keresni a 2.5 fejezetben bemutatott válaszfüggvényt a bemenő forgácsolási paraméterek ( $v_c$ ,  $f$ ) és a kimenő  $F_z$  erőértékek között, amely megfelelő pontossággal leírja a vizsgált paraméter tartományt. (Erre pl.: akkor lehet szükség, ha fennál a delamináció veszélye, ami csökkenthető az  $F_z$  értékek csökkentésével.)

Az empirikus modellben szignifikancia vizsgálat után csak a fúrási folyamatra szignifikáns tényezők szerepelnek. Az empirikus modell a (2) alapján az alábbi:

$$F_z = 34,96 + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot v_c + 627 \cdot f - 3594 \cdot f^2 + 0,862 \cdot v_c \cdot f \quad (3)$$

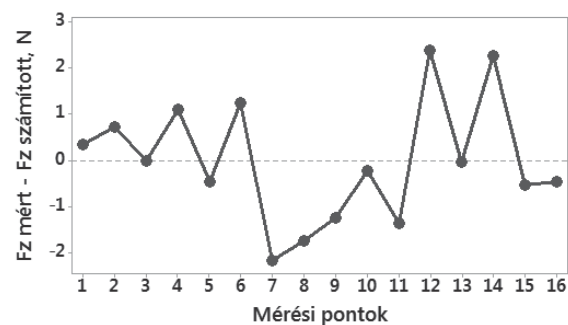
A forgácsolási paraméterek hatása a CFRP anyag fúrási technológiájánál még szemléletesebb a (3) egyenlet grafikus ábrázolásával (7. ábra).



7. ábra. A (3) egyenlet grafikus ábrázolása

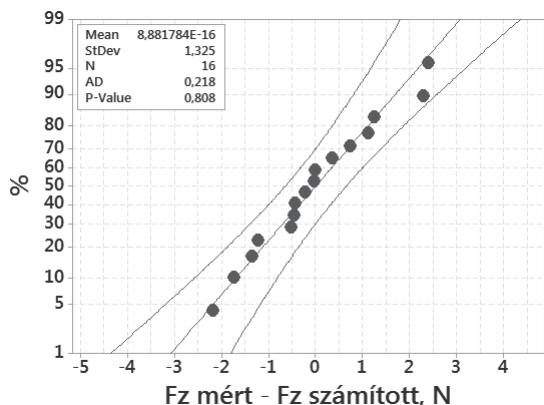
A keresett empirikus modell megfelelőségét azzal lehet bizonyítani, ha a mért értékek és a számított értékek közötti különbségek (reziduumok) eloszlása normális, várható értéke nulla körüli, nagyságuk nem változik a vizsgált tartományon belül a szórásuk pedig minél kisebb.

A 8. ábra az előtolási irányú erő mért és számított értékei közötti különbséget mutatja a mérési pontokban. Az ábrából leolvasható, hogy a keresett modell legnagyobb eltérései a mért értéktől  $-2,17$  N (7. mérési pont), illetve  $2,4$  N (12. mérési pont).



8. ábra. Reziduumok értéke a mérési pontokban

A 9. ábrán a reziduumok értékei láthatóak normalitás hálón ábrázolva. A normalitás háló egy olyan diagram, melynek vízszintes tengelye lineáris (a mért érték van ezen a tengelyen felvéve) a függőleges tengely pedig olyan skálázású, hogy a normál eloszlás képe egyenesnek adódjon. Az ábrából jól kivehető, hogy a reziduumok (prediktív modell hibái) illeszkedése közel egyenesre esik. A hibák várható értéke (átlaguk) gyakorlatilag nulla a szórás pedig  $1,325$  N.

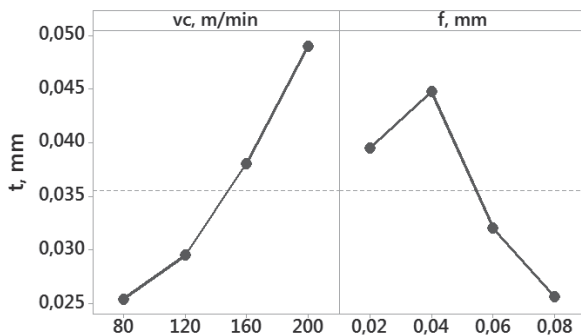


9. ábra. Reziduumok értékei normalitás hálón ábrázolva

### 3.2 Hengerességi vizsgálatok eredményei

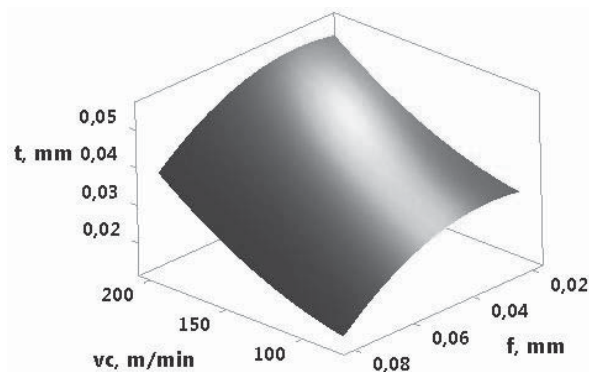
A furatok esetében a hengeresség két egyenként nyolc pontból a munkadarab alsó és felső peremétől 2 mm-re lévő körből lett meghatározva. Ennek eredményeit az 1. táblázat ( $t$  – hengerességi értékek mm) tartalmazza.

Megvizsgálva a hengeresség értékeit a forgácsolási paraméterek függvényében (10. ábra) az a következtetés vonható le, hogy a forgácsoló sebesség növelésével a hengeresség értéke exponenciálisan növekszik. Ezzel szemben az előtolás növelésével a hengeresség értéke csökkenő tendenciát mutat.



10. ábra. Hengerességi értékek főhatás ábrája

A forgácsolási paraméterek együttes hatását szemlélteti a 11. ábra a hengeresség értékére.

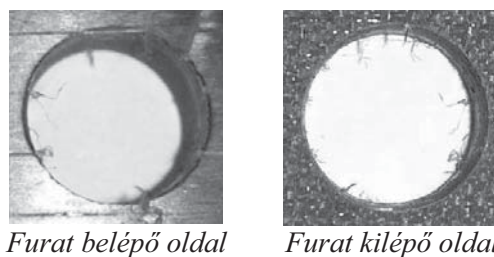


11. ábra. Az előtolás és a forgácsolási sebesség hatása a hengerességre

### 3.3 Delamináció és sorja vizsgálata

A sorjaképződés (szálkiszakadás) jelensége komoly kutatási téma napjainkban is a forgácsolási folyamatokban. A rétegekből felépült ún. szendvics szerkezetű anyagoknál ebben az esetben CFRP-nél a delamináció jelensége is létrejöhet. A delamináció jelensége nem más mint az anyag rétegeinek egymástól való elválása, eltávolodása forgácsolás közben annak hatására. A delamináció jelensége csökkenti az anyag élettartamát, így komoly problémát jelenthet.

Megvizsgálva a sorja jelenséget mind a belépő mind a kilépő oldalon apró szálkitépődések láthatóak (12. ábra) a felső illetve alsó rétegből. Ezeknek a nagyságára és mennyiségére a forgácsolási paramétereknek ebben a vizsgált tartományban nem volt hatása, a jelenség csekély módon, de minden furatnál megfigyelhető.



Furat belépő oldal

Furat kilépő oldal

12. ábra. Sorja és delamináció jelenségének vizsgálata

Klasszikus delamináció jelensége nem volt megfigyelhető egyik kísérleti pontban sem.

### Konklúzió

Ez a tanulmány szénszálerősítésű műanyag fúrási vizsgálatát tárgyalta, a vizsgálatokból az alábbi eredmények vonhatóak le:

- $F_z$  (előtolás irányú) erőre az előtolás van hatással míg a forgácsolási sebesség hatása elhanyagolható;
- empirikus modellt hoztunk létre mellyel a vizsgált forgácsolási paramétertartományon belül becsülhető az előtolási erő értéke. A modell hibái -2,17 N és 2,4 N közöttiek. A mért és a számított erőérték, reziduumok eloszlása normális, várható értékük gyakorlatilag nulla;
- a furatok hengerességének értékét a forgácsoló sebesség növelése exponenciálisan rontja, míg az előtolás növelése a hengeresség javulását vonja maga után;
- hengeresség minimalizálása szempontjából kis forgácsoló sebesség és nagy előtolás javasolt. A vizsgált forgácsolási paraméter tartományon a legkisebb hengerességhez tartozó forgácsolási paraméterek:  $v_c = 80$  m/min,  $f = 0,08$  mm;
- a furatok minkét (szeszám belépő és kilépő) oldalán a felső és az alsó rétegből kismértékű szálkiszakadások figyelhetők meg. A szálkiszakadások mennyisége és nagysága közel állandó minden kísérleti pontban, a szálkiszakadás mértéke nem függ a forgácsolási paramétereiktől;
- delamináció jelensége nem volt megfigyelhető.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-4-I-OE-779/60 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült”

Köszönet illeti a GranTOOL Kft.-t, hogy biztosította a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges szerszámokat, valamint az KANDSi Kft.-t (AKOBEZ), hogy biztosította forgácsolási kísérletekhez szükséges egyedileg gyártott munkadarabokat.

## IRODALOM

- [1] Voss, R., Henerichs, M., & Kuster, F. (2016). Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP). *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65(1), 137-140.
- [2] Geier, N., & Szalay, T. (2017). Optimisation of process parameters for the orbital and conventional drilling of uni-directional carbon fibre-reinforced polymers (UD-CFRP). *Measurement*, 110, 319-334.

- [3] Li, M. J., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Pearson, D., & Leahy, W. (2014). Influence of lay-up configuration and feed rate on surface integrity when drilling carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites. *Procedia CIRP*, 13, 399-404.
- [4] Ramirez, C., Poulachon, G., Rossi, F., & M'Saoubi, R. (2014). Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling. *Procedia CIRP*, 13, 163-168.
- [5] Gaugel, S., Sripathy, P., Haeger, A., Meinhard, D., Bernthaler, T., Lissek, F., ... & Schneider, G. (2016). A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP). *Composite Structures*, 155, 173-183.
- [6] Caggiano, A., Angelone, R., & Teti, R. (2017). Image Analysis for CFRP Drilled Hole Quality Assessment. *Procedia CIRP*, 62, 440-445.
- [7] Merino-Pérez, J. L., Royer, R., Merson, E., Lockwood, A., Ayvar-Soberanis, S., & Marshall, M. B. (2016). Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites. *Composite Structures*, 140, 621-629.
- [8] Feito, N., Milani, A. S., & Muñoz-Sánchez, A. (2016). Drilling optimization of woven CFRP laminates under different tool wear conditions: a multi-objective design of experiments approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(2), 239-251.
- [9] Çelik, A., Lazoglu, I., Kara, A., & Kara, F. (2015). Wear on SiAlON ceramic tools in drilling of aerospace grade CFRP composites. *Wear*, 338, 11-21.
- [10] Celik, A., Lazoglu, I., Kara, A., & Kara, F. (2015). Investigation on the performance of SiAlON ceramic drills on aerospace grade CFRP composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 39-47.
- [11] [http://www.toolontool.hu/DNNGranTool/PDF/YG-1\\_Drill\\_DI473.pdf](http://www.toolontool.hu/DNNGranTool/PDF/YG-1_Drill_DI473.pdf)
- [12] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group