

SORJAVIZSGÁLATI MÉRŐSZÁMOK ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSE SZÉNSZÁLLAL ERŐSÍTETT POLIMER (CFRP) KOMPOZITOKBAN

A COMPARATIVE ANALYSIS OF BURR MEASURES IN CARBON FIBRE REINFORCED POLYMER (CFRP) COMPOSITES

Poór Dániel István¹, Geier Norbert^{1*}, Pereszlai Csongor¹, Balázs Barnabás Zoltán¹

¹ Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.008>

Kulcsszavak:

CFRP
Fúrás
Sorja

Keywords:

CFRP
Drilling
Burr

Cikktörténet:

Beérkezett: 2021.január 14.
Átdolgozva: 2021. április 20.
Elfogadva 2021.április 24.

Összefoglalás

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok forgácsolása során képződő sorja vizsgálatának és jellemzésének számos módszere és mérőszáma terjedt el, az ezzel kapcsolatos szakirodalmat azonban terminológiai és módszertani inkonzisztencia jellemzi. Ebben a rövid áttekintő cikkben a legelterjedtebb CFRP sorjamérőszámok csoportosítása, elemzése és értékelése történik.

Abstract

Nowadays, numerous measurement and evaluation methods and measures of machining induced burr in carbon fibre reinforced polymer (CFRP) are applied; however, the burr evaluation terminology and methodology is inconsistent. In this short review, the key burr-measures are classified, analysed and discussed.

1. Bevezetés

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok alkalmazásának elterjedése a 20. század második felétől rohamosan növekszik [1]. Az CFRP kiváló fajlagos mechanikai tulajdonságainak és méretstabilitásának köszönhetően előszeretettel alkalmazott szerkezeti anyag a „high-tech” szektorokban [2]. A jellemző szerelési megoldások, valamint a szigorú alak- és mérettűrések miatt sokszor elengedhetetlen bizonyos forgácsolási műveletek alkalmazása annak ellenére, hogy a térhálós mátrixú CFRP alkatrészek közel végleges formára laminálhatók/préselhetők. A CFRP kompozitok inhomogenitása és anizotrópiája, valamint a szénszálak erősen abrazív hatása miatt nehezen forgácsolható anyagnak tekintjük őket [3].

A CFRP forgácsolás során keletkező sorja szerelhetőségi nehézségeket, esztétikai hibákat és további anyagkárosodásokat okozhat, ennél fogva keletkezési mechanizmusainak és geometriai jellemzőinek vizsgálata erősen indokolt. A sorjaképződésre a szerszámgeometria, a forgácsolási paraméterek, a szálvágási szög (θ), valamint a megmunkálási környezet geometriai kényszerei (pl. támasztó lemez alkalmazása) szignifikáns hatással vannak. Támasztó lemez alkalmazása nélkül a szélső kompozit rétegek lehámozódása történhet meg, ami rétegelváláshoz (delaminációhoz) és

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 1 463 2641
E-mail cím: geier.norbert@gpk.bme.hu

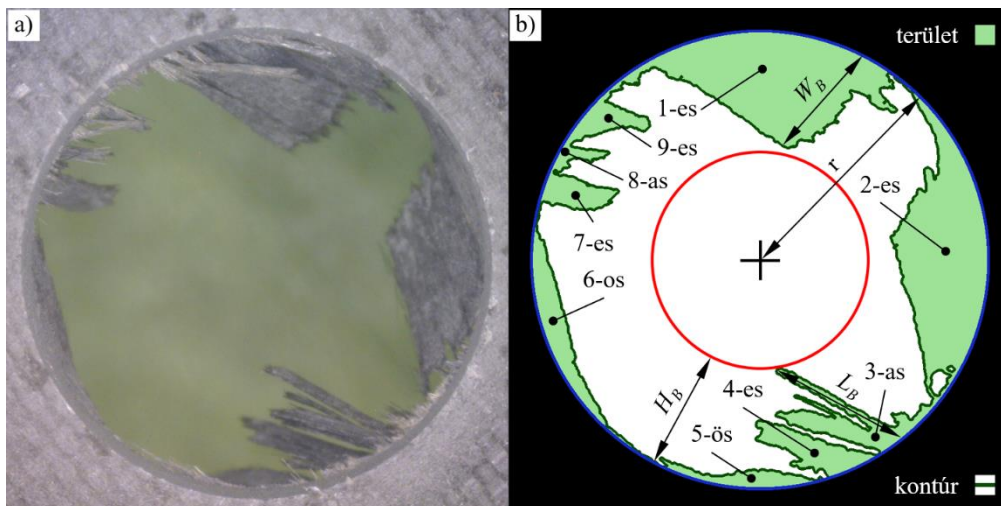
sorjaképződéshez vezethet. A szerszám túl nagyméretű éllekerekítési sugarának esetében a szerszám hajlamosabb kihajlítani, mint sem elvágni az erősítőszálakat, amely jelentős sorjaformációt indukálhat. Ezen felül, egyes kedvezőtlen szálvágási szögek ($\theta=135^\circ\pm\delta$, ahol δ környezetfüggő paraméter) esetében a forgácsképződési mechanizmust a makroméretű repedések jellemzik, a szerszám az erősítő szálakat kihajlítja, majd a szálak visszarugózásának következtében sorja képződik [4].

A CFRP kompozitok forgácsolása során fellépő sorja karakterisztikájához, geometriai jellemzőjéhez és mérőszámaihoz kapcsolódó terminológiában jelentős inkonzisztencia figyelhető meg.

Ezen áttekintő cikk fő célja a hazai és nemzetközi szakirodalomban alkalmazott, a CFRP kompozitok fúrása során keletkező sorja jellemzésére szolgáló mérőszámok csoportosítása, ismertetése és elemzése.

2. Sorja geometriai jellemzői

A forgácsolás során el nem távolított anyagfelesleget összetételétől és helyétől függően számos megnevezéssel illetik: (i) sorja, (ii) vágatlan szál, (iii) vágatlan mátrixanyag, valamint (iv) delamináció. Jelen áttekintő cikk szerzői — Beier [5] munkájában írtakkal egyetértésben — a terminológiai egységesség céljából minden, a nominális geometriához képest mérhetően eltérő anyagtöbbletet sorja elnevezéssel illetik. Az egyes sorját jellemző mérőszámok pontos meghatározása érdekében a sorjakezlet geometria jellemzőinek egzakt meghatározása szükséges. Ezen változatos geometria jellemzők (ahogyan az 1. ábra is illusztrálja) a következők: sorjahossz, sorjamagasság, sorjaszélesség, a sorja kerülete (kontúrja), a sorja területe és a sorjaképződmények száma.



1. ábra. Sematikus ábra a sorjajellemzőkről egy CFRP kompozitba készített furat esetében (a) digitális mikroszkóppal készített eredeti kép, (b) a sorja feldolgozott (szegmentált) képe

3. Sorja mérőszámai

Ezen fejezetben a szakirodalomban fellelhető leggyakrabban használt sorjamérőszámokat csoportosítottuk a mérőszámgenerálás bonyolultsága alapján, továbbá értékeltük őket az alkalmazhatóságuk szempontjából.

3.1. Egyszerű sorjamérőszámok

Az egyszerű sorjamérőszámok bizonyos esetekben kedvezően alkalmazhatók a forgácsolási technológia minősítésére, valamint a gyártott munkadarab kvalifikációjára. Az egyszerű vizuális elemzés és a sorjaképződmények számának meghatározása sok esetben nem igényel speciális berendezést, azonban nem szolgáltatnak reprodukálható és kvalitatív eredményeket. Az egyszerű vizuális vizsgálat során a megmunkált gyártmány közvetlen vizsgálata, vagy a forgácsolt alaksajátosságról készített (pl. optikai úton, vagy röntgengép segítségével) kép elemzése történik

[6]. Az egyszerű vizuális vizsgálat eredménye (I_b) nagyban függ a mérőszemélyzet tapasztaltságától, ennek a szubjektív tényezőnek köszönhetően nem egzakt kvalitatív mérőszámként értelmezhető az I_b (pl.: $I_{b,1}$ ={jelentősen sorjásodott a belépő furatkontúr}; $I_{b,2}$ ={szerelhetőséget jelentősen nem befolyásoló mennyiségű sorja képződött a kilépő furatkontúron}), így a különböző helyeken és/vagy időben végzett mérési eredmények nehezen összehasonlíthatók.

A sorjaképződmények száma (N_b) egy egzakt, kvantitatív mérőszám, amely teljes összehasonlíthatóságot biztosít a különböző méretű alaksajátosságok között (méretfüggetlenségének köszönhetően). A sorja karakterisztikájáról nem hordoz információt az N_b kvantitatív jellege miatt, ezért további vizsgálatok szükségesek a gyártott alkatrész alkalmazhatóságának és az esetleges sorjaeltávolítási műveletek meghatározására. A sorjaképződmények számlálása nem minden esetben igényel digitális kiértékelő szoftvert, azonban a vizsgálat eredményének pontossága nagy mértékben növelhető az automatizált algoritmusok használatával. Voß és munkatársai [7] megalkottak egy újszerű összetett mérőszámot, amely mérőszám generálása során többek között a digitális optikai mikroszkóppal vizsgált furat sorjaképződményeinek számát is figyelembe vették. Az 1. *egyenlet* segítségével transzformálták az N_b értékét, aminek az eredménye a sorjaképződmények fajlagos száma (F_{bn}) elnevezésű mérőszám lett. A szerzők szerint ez az egyenlet más geometriák esetében finomhangolásra szorul, mivel a lineáris gradiens ($1/15$) és k környezetparaméter ideális értéke függ a furat átmérőjétől és a forgácsolási körülményektől (szerszám élgeometria, technológiai paraméterek, szálirány stb.).

$$F_{bn} = \tanh\left(\frac{(N_b)^k}{15}\right) \quad (1)$$

3.2. Hosszúság alapú sorjamérőszámok

A hosszúság alapú sorjamérőszámok alkalmazása széleskörűen elterjedt az iparban, köszönhetően a mérési módszerek (általában optikai mérések mikroszkóppal) egyszerűsége és költséghatékonyasága miatt. A hosszúság, szélesség, magasság és terület sorjakezertistikai geometriai jellemzőket vizsgáló mérőszámok a teljes sorjaképződmény egy részletét jellemzik csak, ezért a forgácsolt alaksajátosság teljes kvalitatív jellemzésére és a sorjakezertistika meghatározására nem alkalmasak.

A sorjahossz (L_b) a maximális lineáris távolság a sorjatő és a sorjavég között (lásd 1. *ábra*) [8], [9]. Az L_b hasznos információval szolgálhat a szerelhetőség vizsgálata során, azonban a sorjakezertistikára nem ad egyértelmű utalást. A különböző geometriával rendelkező alaksajátosságok egymással nem összehasonlíthatók ezzel a mérőszámmal (hiszen pl. az azonos sorjahossz eltérő módon befolyásolja a szerelhetőséget különböző átmérőjű furatok esetében).

Az XY síkban (a furat síkjában) értelmezett sorjamagasság (H_b) a forgácsolt alaksajátosság felülete és a sorjavég közötti távolság a felület normálisára vett irányban (lásd 1. *ábra*) [10], [11]. A Z irányú (furattengely irányú) sorjamagasság (H_{bz}) is gyakran értelmezett mérőszám, mely a sorjavég és a munkadarab felszíne között mérendő a távolsággal egyezik meg. A H_{bz} mérőszámot gyakran alkalmazzák CFRP/Fém kompozit szendvicsszerkezetek minőségi értékelésére [12], [13].

A sorjaszélesség (W_b) adott sorjazónán belül értelmezett szálirányra merőleges legnagyobb távolság (lásd 1. *ábra*) [14]. A W_b nagy mértékben függ a sorján belüli mérés helyétől, ezért egyértelműen meg kell határozni a mérés helyét. A többi hosszúság alapú sorjamérőszám előnyei és hátrányai a W_b esetében is érvényesek.

A kontúr sorjafaktor (F_{bc}) meghatározása során a forgácsolt geometria kontúrjának és a nominális alaksajátosság területének összehasonlítása történik a 2. *egyenletben* látható módon [14], [15]. A mérőszám segítségével következtetéseket lehet tenni a felületintegritásra és a minőségre, azonban egzakt karakterisztikai állításokat nem lehet vele tenni. A különböző méretű alaksajátosságok összehasonlíthatóak az F_{bc} segítségével, hiszen arányosítás történik egy nominális értékhez.

$$F_{bc} = \frac{C_b - C_{nom}}{C_{nom}} \cdot 100 \quad (2)$$

Ahol: F_{bc} (%) a kontúr sorjafaktor, C_b (mm) a forgácsolt furat kontúrja és C_{nom} (mm) a nominális furat kerülete.

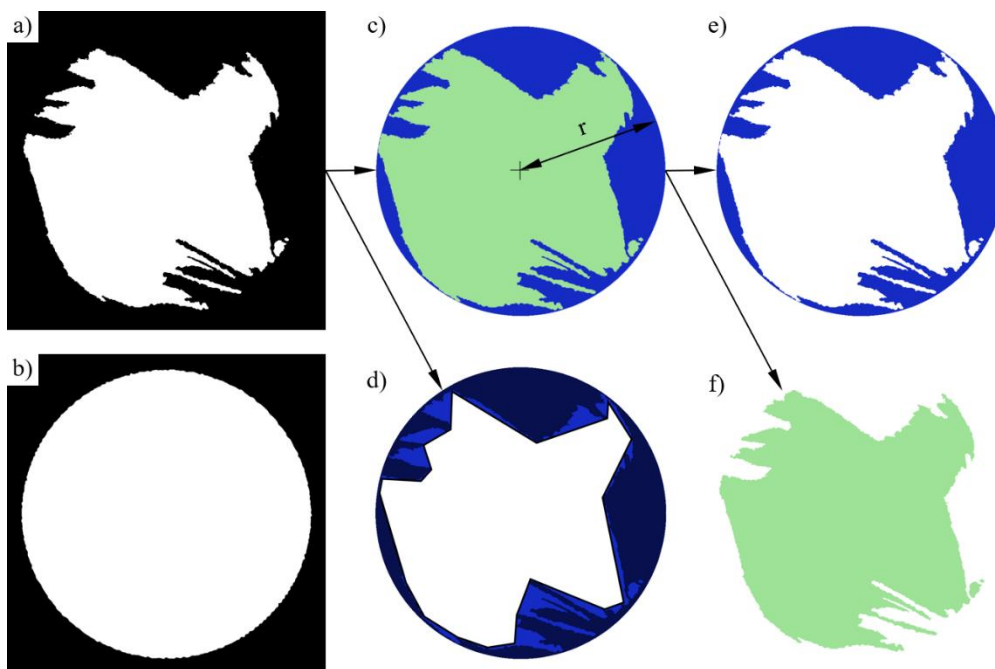
3.3. Területalapú sorjamérőszámok

A területalapú sorjamérőszámok egzakt információval szolgálnak a sorja kétdimenziós leképezésének területéről. Ezen sorjamérőszámokat a kutatók általában más területalapú paraméterekhez arányosítják, így biztosítva a különböző geometriák közötti összehasonlíthatóságot. Ezen mérőszámok a sorjakarakterisztikát (pl. sorjapozíció, sorjátípus) azonban nem jellemzik.

A sorja területének (A_b) mérésekor a forgácsolt geometriáról készített képen a sorja által elfoglalt terület pixeleinek számlálása, majd arányosítása történik (2e. ábra) [11], [16]. Az A_b kvantitatív mérőszám a sorja elhelyezkedésére, valamint karakterisztikájára nem ad egyértelmű információt, továbbá különböző méretű geometriák esetében más kvalitatív jelentőséggel bír az azonos értékű mérőszám. Ez utóbbi hiányosság kiküszöbölhető a nominális geometriához történő fajlagosítással. A sorja területe a közvetlen mérésen kívül közvetett számítással is megkapható, ahogyan a 3. egyenletben is látható [17]. A közvetett módszer előnye, hogy a sorjamentes terület meghatározása kisebb hibával terhelt, mint a sorja kiterjedésének meghatározása.

$$A_b = A_{nom} - A_{free} \quad (3)$$

Ahol: A_b (mm²) a sorja területe, A_{nom} (mm²) a nominális furat területe és A_{free} (mm²) a sorjamentes területe a furatnak.



2. ábra. Sematikus ábra a terület alapú sorjamérőszámok digitális képfeldolgozással történő előállításáról: (a) eredeti binarizált furat kép; (b) binarizált névleges furat; (c) sorjafaktor magyarázata; (d) sorjacsoportok területe (A_{bg}); (e) sorja területe (A_b); (f) a furat sorjamentes területe (A_{free})

A sorjacsoportok területének (A_{bg}) meghatározása hasonló módszerrel történik, mint az A_b esetében, azonban az egymás környezetében lévő sorjaképződmények csoportosításra kerülnek és a befoglaló területük kerül meghatározásra (2d. ábra) [18]. A mérőszámgenerálás gyorsabban történhet, mint a sorja területének esetében, azonban a mérés pontossága kisebb (a sorjaképződmények közötti üres terület figyelmen kívül hagyása miatt).

A sorjafaktor (F_b) mérőszám meghatározása során a sorja területét az ideális furat területéhez arányosítjuk, amelyet a megmunkált geometria kontúrjára illesztett legkisebb köré írható körrel határozhatunk meg (lásd 2c. ábra) [7], [15], [19]. A mérőszámgenerálás az 4. egyenlet alapján

történik. A mérőszám előnye, hogy a különböző méretű és geometriájú alakajátosságok összehasonlíthatók, továbbá a mérőszámra egyedül a sorja rendelkezik befolyásoló hatással, a technológiából adódó egyéb hibák kevésbé jelennek meg. A mérőszám a sorja elhelyezkedéséről és karakterisztikájáról nem ad egyértelmű információt, ezért további vizsgálatok lehetnek szükségesek pl. a sorjaeltávolítási művelet primer információinak meghatározására.

$$F_b = \frac{A_{nom} - A_{free}}{A_{nom}} \cdot 100 = \frac{A_b}{A_{nom}} \cdot 100 \quad (4)$$

Ahol: F_b (%) a sorjafaktor, A_{nom} (mm²) a nominális furat területe, A_{free} (mm²) a sorjamentes területe a furatnak és A_b (mm²) a sorja területe.

A sorjamentes faktor (F_{bf}) a furat sorjamentes területének és az ideális alakajátosság területének összehasonlításával számítható (*2c. ábra* és *5. egyenlet*) [20], [21]. Az F_{bf} mérőszám meghatározásakor az ideális terület a nemzetközi szakirodalomban általában egy etalon furat segítségével történik. Az arányosításnak köszönhetően a különböző geometriák összehasonlíthatók, azonban ez a mérőszám sem ad egzakt információt a sorjalokációról és karakterisztikájáról. A mérőszámgenerálás pontosabbnak mondható, mint az F_b esetében, hiszen a sorja szeparációja a furattól további hibát visz a rendszerbe, azonban a sorjamentes terület egyértelműen és közvetlenül alkalmazható. Az ideális etalon furat alkalmazásakor a technológiából adódó alak- és méretpontatlanságok hibaként jelennek meg a mérőszámokban, ezért becslése a körillesztéssel támogatott számításokkal javasolt.

$$F_{bf} = \frac{A_{free}}{A_{nom}} \cdot 100 \quad (5)$$

Ahol: F_{bf} (%) a sorjamentes faktor, A_{nom} (mm²) a nominális furat területe és A_{free} (mm²) a sorjamentes területe a furatnak.

A felsorolt (i) egyszerű, (ii) hosszúság és (iii) területalapú sorjajellemzési módszereken és mérőszámokon felül olyan sorját jellemző összetett mérőszámok fejlesztése is történt számos kutató által, melyek a sorján kívül egyéb makrogeometriai fűrésindukált hibát (pl.: delaminációt) is figyelembe vesznek [7], [14], [22], [23].

A jövőben várhatóan lesznek törekvések a szálerősített polimer kompozitok sorjamérési módszereinek és mérőszámainak egységesítésére, valamint szabványban történő rögzítésére. Ezen felül várhatóan olyan komplex mérőszámok alkalmazása fog elterjedni, amelyek teljesebb képet nyújtanak a sorja karakterisztikájáról és mennyiségéről, illetve további információval szolgálnak a szerelhetőségre és a sorja eltávolítási operációk energiaigényére.

4. Összefoglalás

A jelen áttekintő cikkben a szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok fűrése során keletkező sorja mérőszámainak összefoglalása és elemzése történt. Az egyszerű sorjamérőszámok (I_b , N_b , F_{bn}) gyors és egyszerű kiértékelést tesznek lehetővé, azonban az I_b eredménye erősen szubjektív, N_b és F_{bn} nem ad információt a sorjajellemzéséről.

A hosszúság alapú sorjamérőszámok (L_b , H_b , H_{bz} , W_b , F_{bc}) alkalmazása egyszerű és költséghatékony, azonban sok esetben a mérőszámok csak a sorjaképződés egy részletét jellemzik, ezért érdemes a sorjaképződés mérőszámainak átlagolását is elvégezni a teljes sorja jellemzésének okán. Különböző méretű geometriák nem összehasonlíthatók segítségükkel, ezért javasolt egy nominális értékhez történő arányosításuk.

A területalapú sorjamérőszámok (A_b , A_{bg} , F_b , F_{bf}) alkalmazása információértékük miatt gyakori a kutatók körében, hiszen ezen mérőszámok a teljes sorja mennyiségére adnak utalást. F_b és F_{bf} egy nominális értékhez történő arányosítása miatt összehasonlíthatóságot tesz lehetővé a különböző geometriák között. Azonban a sorjajellemzésére vonatkozóan ezen mérőszámok sem hordoznak releváns információt.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás részben az Innovációs és Technológiai Minisztérium OTKA-PD20-134430 kódszámú Posztdoktori Kutatási Projekt és az ÚNKP-20-3 és ÚNKP-20-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjainak a Nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alapról finanszírozott támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- [1] A. Toldy et al.: The Effect of Multilevel Carbon Reinforcements on the Fire Performance, Conductivity, and Mechanical Properties of Epoxy Composites, *Polymers*, Feb. 2019, Vol. 11, No. 2, Art. No. 2, DOI: 10.3390/polym11020303.
- [2] N. Forintos and T. Czigany: Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review, *Compos. Part B Eng.*, Apr. 2019, Vol. 162, pp. 331–343, Doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.098.
- [3] J. Xu, M. Ji, J. Paulo Davim, M. Chen, M. El Mansori, and V. Krishnaraj: Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills, *Compos. Struct.*, 2020, Vol. 234, p. 111727, DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111727.
- [4] K. M. John and S. Thirumalai Kumaran: Backup support technique towards damage-free drilling of composite materials: A review, *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2020, Vol. 3, No. 4, pp. 357–364, DOI: 10.1016/j.ijlmm.2020.06.001.
- [5] H.-M. Beier, *Handbuch Entgrattechnik: Wegweiser zur Gratminimierung und Gratbeseitigung für Konstruktion und Fertigung*. Hanser, 1999.
- [6] G. He, H. Li, Y. Jiang, X. Qin, X. Zhang, and Y. Guan: Helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks with varying machining parameters, *Trans. Tianjin Univ.*, Jan. 2015, Vol. 21, No. 1, pp. 56–63, DOI: 10.1007/s12209-015-2360-9.
- [7] R. Voß, M. Henerichs, S. Rupp, F. Kuster, and K. Wegener: Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2016, Vol. 12, pp. 56–66, DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.09.003.
- [8] M. Li, M. Huang, X. Jiang, C. Kuo, and X. Yang: Study on burr occurrence and surface integrity during slot milling of multidirectional and plain woven CFRPs, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Jul. 2018, Vol. 97, No. 1, pp. 163–173, DOI: 10.1007/s00170-018-1937-6.
- [9] J. Kim, Y.-B. Kim, J. W. Seo, and H. W. Park: Deburring drilled holes in CFRP composites with large pulsed electron beam (LPEB) irradiation, *J. Manuf. Process.*, Apr. 2019, Vol. 40, pp. 68–75, DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.03.001.
- [10] D. Wang, F. Wang, Z. Wang, G. Bi, and Q. Wang: Influence of Dynamic Change of Fiber Cutting Angle on Surface Damage in CFRP Milling, in *Recent Advances in Intelligent Manufacturing*, Singapore, 2018, pp. 428–439, DOI: 10.1007/978-981-13-2396-6_40.
- [11] N. Geier, T. Szalay, and I. Biró: Trochoid milling of carbon fibre-reinforced plastics (CFRP), *Procedia CIRP*, 2018, Vol. 77, pp. 375–378, DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.039.
- [12] N. Sugita, L. Shu, K. Kimura, G. Arai, and K. Arai: Dedicated drill design for reduction in burr and delamination during the drilling of composite materials, *CIRP Ann.*, 2019, Vol. 68, No. 1, pp. 89–92, DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.094.
- [13] S. Dong, W. Liao, K. Zheng, J. Liu, and J. Feng: Investigation on exit burr in robotic rotary ultrasonic drilling of CFRP/aluminum stacks, *Int. J. Mech. Sci.*, 2019, Vol. 151, pp. 868–876, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.12.039.
- [14] A. Hrechuk, V. Bushlya, and J.-E. Ståhl: Hole-quality evaluation in drilling fiber-reinforced composites, *Compos. Struct.*, 2018, Vol. 204, pp. 378–387, DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.105.
- [15] D. Poór, N. Geier, C. Pereszlai, and N. Forintos: A pilot experimental research on drilling of CFRP under tensile stress. In: Zlatan Car, Jan Kudláček (eds.), *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2019*, 2019, pp. 126–129.
- [16] K. M. Park, R. Kurniawan, Z. Yu, and T. J. Ko: Evaluation of a hybrid cryogenic deburring method to remove uncut fibers on carbon fiber-reinforced plastic composites, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Apr. 2019, Vol. 101, No. 5, pp. 1509–1523, DOI: 10.1007/s00170-018-3045-z.
- [17] S. Gaugel et al.: A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP), *Compos. Struct.*, 2016, Vol. 155, pp. 173–183, DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.08.004.
- [18] J. Xu, Q. An, X. Cai, and M. Chen: Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Oct. 2013, Vol. 14, No. 10, pp. 1687–1696, DOI: 10.1007/s12541-013-0252-2.
- [19] C. Pereszlai and N. Geier: Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of CFRPs, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Feb. 2020, Vol. 106, No. 9, pp. 3913–3930, DOI: 10.1007/s00170-019-04842-4.
- [20] N. Geier, G. Póka, and T. Szalay: Direct monitoring of hole damage in carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2018, Vol. 448, p. 012003, DOI: 10.1088/1757-899X/448/1/012003.
- [21] N. Geier, T. Szalay, and M. Takács: Analysis of thrust force and characteristics of uncut fibres at non-conventional oriented drilling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastic (UD-CFRP) composite laminates, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Feb. 2019, Vol. 100, No. 9, pp. 3139–3154, DOI: 10.1007/s00170-018-2895-8.
- [22] P. Masek, P. Zeman, P. Kolar, and F. Holesovsky: Edge trimming of C/PPS plates, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Mar. 2019, Vol. 101, No. 1, pp. 157–170, DOI: 10.1007/s00170-018-2857-1.
- [23] F. Wang, X. Wang, X. Zhao, G. Bi, and R. Fu: A numerical approach to analyze the burrs generated in the drilling of carbon fiber reinforced polymers (CFRPs), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Feb. 2020, Vol. 106, No. 7, pp. 3533–3546, DOI: 10.1007/s00170-019-04872-y.