

ÜVEGSZÁLLAL ERŐSÍTETT POLIMER (GFRP) MARÁSI VIZSGÁLATA

THE INVESTIGATION OF MILLING PROCESS OF GLASS FIBRE REINFORCED PLASTIC

¹Horváth Richárd, egyetemi docens, e-mail: horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

²Stadler Róbert Gábor, demonstrátor, e-mail: stadlerrobertgabor@gmail.com

^{1,2}Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

ABSTRACT

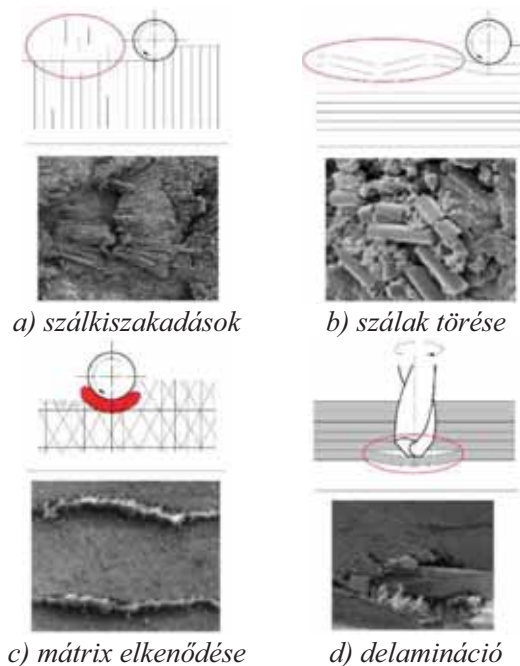
The usage of fibre-reinforced polymers is increasing nowadays. This increase is due to good properties such as high strength and low weight. The cutting of fibre-reinforced polymers raises new problems such as: fibre pull out, fibre breakage, delamination and matrix smearing. In this study the milling experiments of glass fibre reinforced polymer (GFRP) were carried out. In this investigation so-called full factorial design of experiment was performed. The cutting parameters (cutting speed, feed rate, depth of cut) on three levels were changed. During the milling tests the force components (F_x , F_y , F_z), average surface roughness (R_a) and ten-point height (R_z) were measured. Predictive models were built to estimate the R_a , R_z and calculated F_e (resultant force) and the fibre pull out and the delamination were also investigated. The effect of the cutting parameters on the parameters examined were concluded.

1. BEVEZETÉS

A szálerősítésű (pl.: üveg vagy szén) anyagok (GFRP, CFRP) felhasználása napjainkban növekszik, köszönhetően azok kedvező mechanikai tulajdonságainak. Erre a legjobb példa, a Boeing 787 Dreamliner repülőgép, melynek tömegét 50%-ban kompozitok teszik ki. Továbbá a repülőgép gyártók azt állítják, hogy a következő generációjú repülőgépekben, ahol a kompozitok aránya több, mint 50% lesz, ez csökkentheti a tüzelőanyag felhasználást, illetve a CO₂ kibocsátást is 20-25%-kal [1]. A kompozitok elterjedését az is egyértelműen mutatja, ha megvizsgáljuk az 1995-ben bevezetett Boeing 777-es típust, mely tömegének mindössze 10%-a volt kompozit [2]. Sőt a hosszútávú stratégiai célok a repülőgépipar ágazatban, hogy 2050-re 75%-kal csökkentsék a CO₂ és 90%-kal az NO_x kibocsátást kilométerenként, valamint 65%-kal csökkentsék a zajterhelést. Ezeket a célokat többek között kis

tömegű újfejlesztésű anyagokkal lehet elérni, mint amilyenek a kompozitok is. [3].

A szálerősítésű anyagok megmunkálása történhet forgácsolással. A forgácsolás során számos új probléma jelentkezik: szálkiszakadás, szálak összetörése, mátrix anyag elkenődése, valamint delamináció jelensége (lásd 1. ábra).



1. ábra Szálerősítésű anyagok forgácsolási problémái ([4] alapján)

Ezek a forgácsoláskor fellépő problémák rontják a kész darab mechanikai tulajdonságait, ezért azok minimalizálása illetve elkerülése szükséges. Számos kutatás foglalkozik a szálerősítésű anyagok forgácsolhatósági vizsgálataival.

Mathivanan és társai [5] GFRP és CFRP műanyagok forgácsolhatóságát vizsgálták zárt horony marása esetén. A 15 mm vastag munkadarabban a szálorientáció rétegenként egymásra merőleges volt. A forgácsolási kísérletben (kilenc mérési pont) Ø10mm K10 keményfém marót használtak, a forgácsolási

paramétereket három szinten változtatták. Alapvetően az eredő erőt vizsgálták és megállapították, hogy különösen az előtolás növeli jobban az eredő erőt. Bár azonos forgácsolási paraméterek mellett a GFRP kisebb forgácsolási erőt igényel, de a forgácsolási paraméterek növelésekor a CFRP forgácsoló erő igénye jobban növekszik, mint a GFRP erőigénye. Végezetül kis előtolást és magas forgácsolósebességet ajánlanak az ilyen típusú anyagok forgácsolásához.

Hasonlóan ez előző kutatáshoz 15 mm-es GFRP marási vizsgálatát L₉-es Taguchi módszerrel végezték el Ø10mm K8-as szerszámmal Ghalme és társai [6]. A forgácsolási paramétereket három szinten változtatták és mérték a felületi érdességet. Eredményeikben elemezték a forgácsolási paraméterek hatását a felületi érdességre, valamint optimális forgácsolási paramétereket állapítottak meg a felületi érdesség minimalizálására.

Jenarthanan és Naresh [7] L₂₇-es Taguchi tervvel elemezték a GFRP anyag marási technológiájánál az eredő forgácsolási erőt és a delaminációt. Vizsgálatukban három szinten változtatták a forgácsolási paramétereket, valamint a (Ø5mm) maró szerszámok spirál szögét és a szálorientációt. Méréseikből optimális forgácsolási paramétereket, spirálszögét és szálorientációt állapítottak meg az eredő erő és a felületi érdesség minimalizálása érdekében.

Dash és társai [8] TiO₂-vel töltött GFRP marását vizsgálták. Kísérleteikben a forgácsolási paramétereket három szinten változtatták és húsz mérési pont alapján elemezték a delaminációs jelenséget és négy érdességi paramétert (*Ra*, *Rt*, *Rsm*, *Rz*). Az előző vizsgálatokhoz hasonlóan olyan forgácsolási paraméter kombinációt kerestek, ahol minimalizálhatók az érdességi paraméterek és a delamináció. Az eredményeikből arra jutottak, hogy az *Ra* paraméterre a forgácsoló sebesség, az *Rsm*-re a fogásmélység, *Rz* paraméterre és a delaminációra pedig az előtolás a legszignifikánsabb.

Razfar és Zanjani [9] is optimális forgácsoló paramétereket keresett GFRP marásának vizsgálatokor, genetikus algoritmus és neurális háló módszerekkel. Vizsgálatukban a forgácsolási paramétereket három szinten változtatták valamint kétélű és négyélű (Ø4mm) marót alkalmaztak. Teljes kísérletet végeztek. Hasonlóan az előbb bemutatott kutatási eredményekhez Razfar és Zanjani [9] is arra jutottak, hogy nagyobb forgácsoló sebességgel és alacsonyabb előtolási sebességgel jobb felületi érdesség érhető el valamint alacsonyabb forgácsoló sebességgel és alacsonyabb előtolási sebességgel kisebb a delamináció.

Ebben a tanulmányban GFRP marási vizsgálatát végezzük el. A forgácsolási paramétereket három szinten változtatva teljes kísérletet elvégezve. A kísérletek során elemezzük a forgácsolási eredő erőt, a két, leggyakrabban használt érdességi paramétert (*Ra*, *Rz*), valamint a szálkiszakadást és a delaminációs jelenséget is.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. A kísérletben használt alapanyag és szerszám
A forgácsolási kísérleteket egy 26 rétegű, üvegszállal erősített kompoziton végeztük. A rétegrendet tekintve a szálak egymásra merőlegesen voltak elhelyezve (2. ábra).



2. ábra Rétegek szálrendezése a munkadarabban

A munkadarab (3. ábra) vákuuminfúziós technológiával készült. Az üvegszál típusa E-glass, kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Az E-Glass osztályú üvegszálak kémiai összetétele [10]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
55.0	14.0	0.2	7.0	22.0	1.0	0.5	0.3	-

A mátrix anyag Araldite LY1564 epoxigyanta és Aradur 3487 térhálósító.

A marási kísérletek egy üveg- és szénszál erősítésű kompozitokhoz specializált Ø10 mm-es gyémánt bevonatú, mikrofogazatú keményfém maróval lettek végezve (3. ábra). A gyémánt bevonat növeli a szerszám kopásállóságát, a mikrofogazat pedig csökkenti a delaminációs károsodások és szálkiszakadás keletkezését.



3. ábra Forgácsolási kísérlet elrendezése

2.2. A kísérletben használt mérőeszközök és mért paraméterek

A marási kísérletek során az F_x , F_y és F_z (3. ábra) irányú erőkomponensek mérésére piezoelektromos elven működő KISTLER 9257b erőmérő rendszert alkalmaztunk. Az erőmérő a munkadarab befogó alá lett felszerelve. Az erőmérő mérési tartománya $F_x = F_y = -5 \dots 5$ kN, valamint $F_z = -5 \dots 10$ kN [11]. Az erőadatok Kistler DynoWare szoftverrel lettek kielemezve.

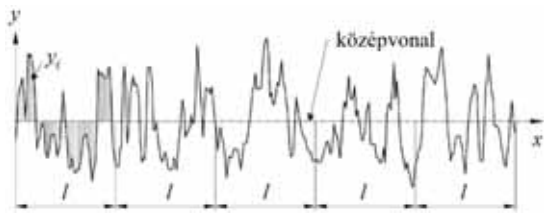
A szerszámra és a munkadarabra az erőkomponensek eredője hat, ezért a mért három erőkomponens eredőjét (F_e) vizsgáljuk:

$$F_e = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

A forgácsolási kísérletek után vizsgáltuk a szálkiszakadást (1.a ábra) és a delaminációt (1.d ábra) is, egy Nikon SMZ18 sztereó mikroszkóppal. A képeket az Image-Pro Insight szoftver segítségével készítettük.

A felületi érdesség mérése Mitutoyo SJ-301 érdességmérővel történt (cut-off, $\lambda_s = 2,5$ mm; alapmérési hosszok száma, $N = 5$). Az iparban gyakran használt érdességi paramétereket vizsgáltuk, úgymint az átlagos felületi érdesség (R_a) valamint az egyenetlenség magasság (R_z). (Minden érdességi paraméter háromszor lett megmérve, és azok átlagát használtuk fel.)

Az átlagos felületi érdesség paraméter (R_a) (4. ábra) a legismertebb érdességi paraméterek egyike, mely alapvetően a felület magasságirányú leírását szolgálja és értéke jó képet ad a felület finomságáról, durvaságáról.



4. ábra Átlagos felületi érdesség értelmezése [12]

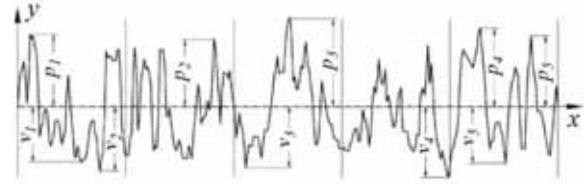
Az átlagos felületi érdesség matematikai definíciója, valamint annak digitális mérési adatokból való meghatározása az alábbi [12]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3)$$

ahol n – az értékelési hossz mentén vett minták száma; y – az ordináta.

A másik paraméter az R_z mely a vizsgált felület szakasz öt legnagyobb csúcs, valamint öt legmélyebb völgy értékét elemzi (5. ábra).



5. ábra Az egyenetlenség magasság értelmezése ($R_{z(ISO)}$, $R_{z(DIN)}$) [12]

Az R_z matematikai meghatározása kétféle módon történhet, mely a következő [17]:

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (4)$$

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (5)$$

ahol n az értékelési hossz mentén vett minták száma, p – csúcsmagasság, v – völgymélység.

2.3 Alkalmazott kísérletterv bemutatása

A marási kísérletek teljes kísérletterv alapján készültek, mely olyan kísérletsorozat, amelyben a faktorok összes lehetséges szintkombinációját realizáljuk. A kiértékeléshez a válaszfüggvények módszerét (RSM) használtuk. A forgácsolási kísérletek alatt három bemenő faktort változtattunk (forgácsoló sebesség, előtoló sebesség, és fogásmélység) három szinten. A szintek egymástól ekvidisztáns távolságra vannak. A mért paraméterek az eredő erő (F_e) és a két érdességi paraméter (R_a , R_z).

Célunk, hogy megtaláljuk a kapcsolatot a független bemenő paraméter(ek) – x_1 , x_2 , x_3 – és a függő kimenő paraméter(ek) Y között:

$$Y = \Omega(x_1, x_2, x_3) \quad (6)$$

ahol, Ω a válasz függvény, mely az alábbi általános alakban írható fel:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (7)$$

ahol, b_0 , b_i és b_{ij} a számított koeficienssek; x_1 , x_2 és x_3 a bemenő paraméterek; ε a hiba.

A teljes 3^3 -on kísérlettervet a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. A 3^3 -on kísérletterv mérési pontjai

Mérési pontok	Bemenő paraméterek szintjei		
	x_1 (v_e)	x_2 (v_f)	x_3 (a_p)
1.	-1	-1	-1
2.	-1	-1	0
3.	-1	-1	1
4.	-1	0	-1
5.	-1	0	0
6.	-1	0	1
7.	-1	1	-1
8.	-1	1	0

Mérési pontok	Bemenő paraméterek szintjei		
	$x_1 (v_c)$	$x_2 (v_f)$	$x_3 (a_p)$
9.	-1	1	1
10.	0	-1	-1
11.	0	-1	0
12.	0	-1	1
13.	0	0	-1
14.	0	0	0
15.	0	0	1
16.	0	1	-1
17.	0	1	0
18.	0	1	1
19.	1	-1	-1
20.	1	-1	0
21.	1	-1	1
22.	1	0	-1
23.	1	0	0
24.	1	0	1
25.	1	1	-1
26.	1	1	0
27.	1	1	1

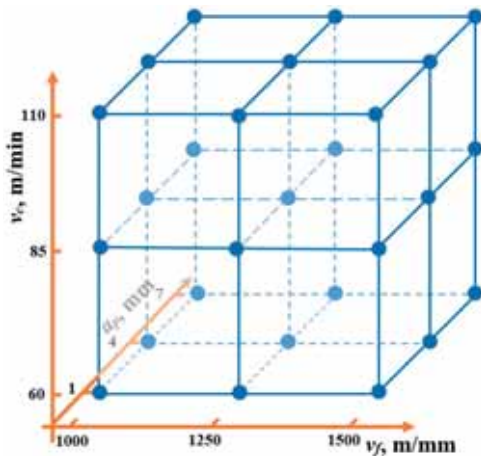
2.4 Alkalmazott kísérletterv mérési pontjai

A szakirodalom és szerszám katalógus ajánlása alapján a beállítandó forgácsolási paramétereket és azok szintjeit a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. Forgácsolási paraméterek szintjei

Paraméterek	Szintek		
	-1	0	1
x_1 forgácsoló sebesség – v_c , m/min	60	85	110
x_2 előtoló sebesség – v_f , mm/min	1000	1250	1500
x_3 fogásmélység – a_p , mm	1	4	7

A 2. és a 3. táblázat alapján a mérési pontokat a forgácsolási paraméter tartományon a 6. ábra szemlélteti.

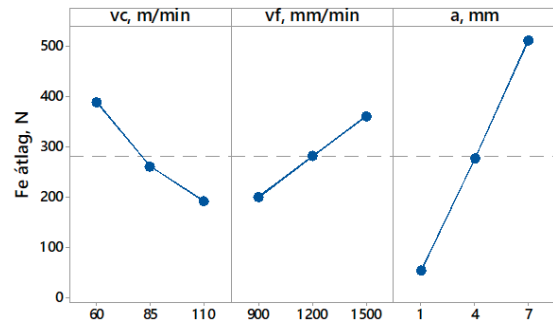


6. ábra Mérési pontok elhelyezkedése a forgácsolási paramétertartományban

3. EREDMÉNYEK

3.1 Forgácsolási paraméterek hatása az eredő erőre (Fe)

A 7. ábra a forgácsolási paraméterek hatását mutatja az eredő erőre.



7. ábra Eredő erő (Fe) főhatás ábrája

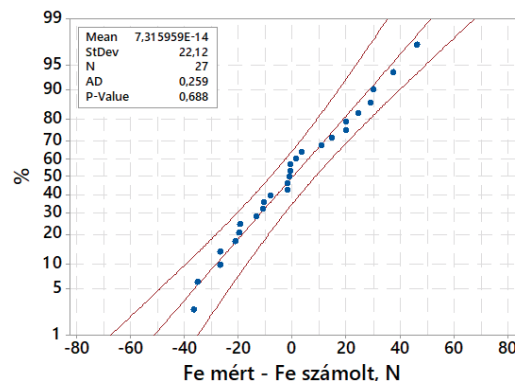
A főhatás ábrából látható, hogy míg a forgácsoló sebesség növelése csökkenti, addig az előtolás és a fogásmélység növelésével nő az eredő erő értéke.

3.2 Prediktív modell az eredő forgácsolási erő becslésére

Szignifikancia vizsgálatot végeztünk, mely megmutatta, hogy a v_f^2 és az a^2 nincs hatással az eredő erőre, így a redukált modell a (7) alapján a következő:

$$F_e = 133 - 233 \cdot 10^{-2} \cdot v_c + 3032 \cdot 10^{-4} \cdot v_f + 826 \cdot 10^{-1} \cdot a_p + 464 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 - 4037 \cdot 10^{-6} \cdot v_c \cdot v_f - 11662 \cdot 10^{-4} \cdot v_c \cdot a_p + 7733 \cdot 10^{-5} \cdot v_f \cdot a_p \quad (8)$$

A prediktív modell jóságát reziduum vizsgálatokkal lehet elvégezni. Ha a reziduumok (mért és számított értékek közötti különbség) eloszlása normális, a várható értékük nulla körüli, valamint minél kisebb a szórásuk, a prediktív modell technológiai előtervezésben megfelelőnek tekinthető. A 8. ábra az eredő erő reziduumait ábrázolja normálitás hálón, melyről leolvasható, hogy az eredő erő becslésekor a hibák várható értéke gyakorlatilag zérus, a hibák eloszlása jól közelíti a normálist, azok szórása 22,12 N.

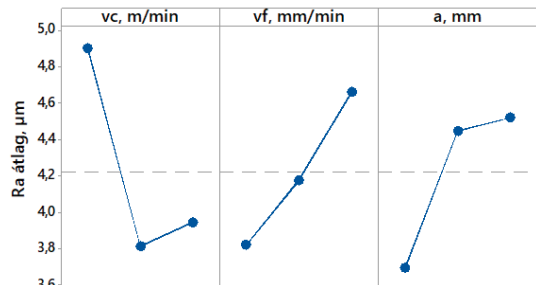


8. ábra Eredő erő reziduumainak ábrázolása normalitás hálón

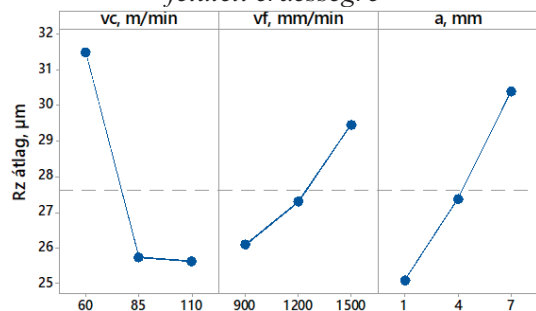
3.3 Forgácsolási paraméterek hatása a felületi érdesség paraméterekre

A 9. ábra a forgácsolási paraméterek hatását mutatja a vizsgálat felületi érdesség

paraméterekre. Az ábrákon látható, hogy a forgácsolási sebesség növelésével csökkennek a vizsgált érdességi értékek, majd a 85 m/min és a 110 m/min-es tartományban minimális emelkedés (R_a), illetve kisebb intenzitású csökkenés (R_z) tapasztalható. Az előtolósebességnél és a fogásmélységnél jól megfigyelhető, hogy a paraméterek növelésével romlanak az érdességi jellemzők.



a) Forgácsolási paraméterek hatása az átlagos felületi érdességre



b) Forgácsolási paraméterek hatása az egyenetlenség magasság érdességi paraméterre

9. ábra Felületi érdesség paraméterek főhatás ábrája

3.4 Prediktív modell az átlagos felületi érdesség (R_a) valamint az egyenetlenség magasság (R_z) becslésére

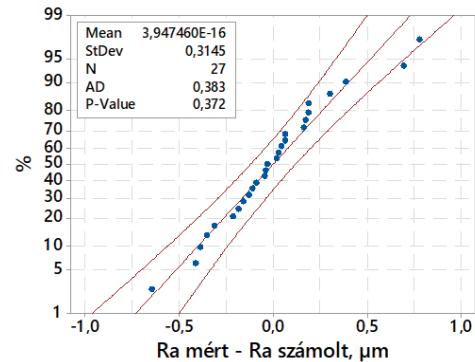
A gyártott alkatrészek egyik fontos kritériuma azok felületi érdessége. Ezért célszerű ismerni a beállítható forgácsolási paraméterek hatásán túl a várható felületi érdességi paraméterek értékét is. Ezért olyan empirikus modelleket készítettünk, melyekkel jól becsülhető a vizsgált anyag érdessége a beállított forgácsolási paraméterek függvényében. A szignifikancia vizsgálatból kiderült, hogy az átlagos felületi érdességre a v_f^2 nincs hatással, így a modell az alábbi:

$$R_a = 9,72 - 1614 \cdot 10^{-4} \cdot v_c + 291 \cdot 10^{-5} \cdot v_f - 431 \cdot 10^{-3} \cdot a_p + 974 \cdot 10^{-6} \cdot v_c^2 - 379 \cdot 10^{-4} \cdot a_p^2 - 36 \cdot 10^{-6} \cdot v_c \cdot v_f + 487 \cdot 10^{-5} \cdot v_c \cdot a_p + 382 \cdot 10^{-6} \cdot v_f \cdot a_p \quad (9)$$

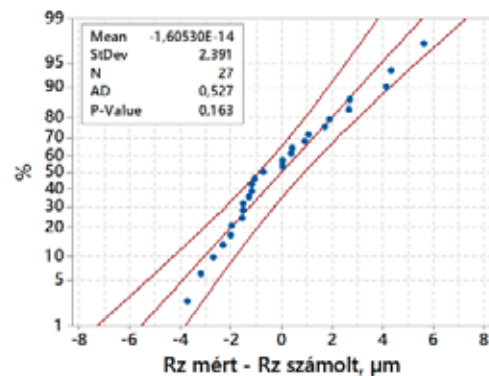
Az egyenetlenség magasság értékeire pedig a v_f^2 , a_p^2 , $v_c v_f$ valamint $v_c a_p$ tagok nincsenek hatással, így a prediktív modell:

$$R_z = 703 \cdot 10^{-1} - 88 \cdot 10^{-2} \cdot v_c - 477 \cdot 10^{-5} \cdot v_f - 233 \cdot 10^{-2} \cdot a_p + 449 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 259 \cdot 10^{-5} \cdot v_f \cdot a_p \quad (10)$$

Az egyenletek jóságát szintén reziduum vizsgálattal ellenőriztük. A 10. a) és b) ábrákon jól látható, hogy a hibák eloszlása közelíti a normálist, valamint a hibák várható értéke gyakorlatilag nulla a szórásuk pedig igen kicsi, R_a esetén 0,31 μm, R_z esetén pedig 2,4 μm.



a) Átlagos felületi érdesség reziduumainak ábrázolása normalitás hálón



b) Egyenetlenség magasság reziduumainak ábrázolása normalitás hálón

10. ábra Prediktív egyenletek (felületi érdesség) hibáinak vizsgálata

3.5 Szálkiszakadás vizsgálata

A szálkiszakadás mindig a kilépő oldalon az előtoló sebesség vektorral megegyező száliránnyal rendelkező rétegek esetében figyelhető meg az ellenirányú marás oldalán (11. ábra). A szálkiszakadások forgácsolási paraméterektől függetlenek (a vizsgált forgácsolási tartományban) a méretük minden esetben $d/2$ körüli.



11. ábra Szálkiszakadások a marás kilépő felületén ($a_p = 7$ mm)

3.6 Delamináció vizsgálat

Delamináció ebben az esetben a marás következtében szétváló felső rétegeket jelenti. Megvizsgálva az összes forgácsolási kombinációval történt mart felületeket releváns delamináció nem volt észlelhető (12. ábra).



12. ábra Mart felületek felülnézeti képe

4. ÖSSZEGZÉS

Ebben a publikációban GFRP marásának vizsgálatát végeztük el teljes kísérletterv segítségével. A forgácsolási paramétereket három szinten változtattuk, mértük az eredő forgácsolási erőt, valamint a mart felületek R_a , R_z érdességi paramétereit. Főhatás ábrákkal elemeztük, a forgácsolási paraméterek hatását a vizsgált jellemzőkre, prediktív modelleket készítettük melyek a technológiai előtervezést segíthetik, valamint elemeztük a szálkiszakadás és a delamináció jelenségét. Vizsgálatainkból az alábbi következtetések vonhatók le:

- az eredő forgácsoló erőt a forgácsoló sebesség növelése csökkenti, az előtoló sebesség és a fogásmélység növelése növeli.
- az R_a , R_z paramétereket a sebesség növelése csökkenti, és hasonlóan az eredő erőhöz, az előtoló sebesség és a fogásmélység növelése rontja az érdességi paramétereket.
- az épített prediktív modellek pontossága a technológiai előtervezésben megfelelőnek mondhatók, azok hibái normális eloszlást mutatnak és várható értékük nulla körüli.
- szálkiszakadások a kilépési oldalon találhatóak az ellenirányú marási oldalon, melyek nem függenek a forgácsolási paramétereiktől. A szálkiszakadások nagysága minden mérési pontban körülbelül egyforma ($d/2 \sim$ szerszám átmérő fele).
- delamináció a vizsgálatok során nem fedezhető fel, tehát megfelelő szerszámmal megfelelő forgácsolási paraméterekkel a delamináció elkerülhető illetve minimalizálható.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket szeretnék kifejezni a KANDSI Kft.-nek (AKOBEZ), hogy biztosította az egyedileg gyártott munkadarabokat, illetve a

GranTOOL Kft.-nek, hogy biztosította a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges szerszámot.

6. IRODALOM

- [1] Timmis, A. J., Hodzic, A., Koh, L., Bonner, M., Soutis, C., Schäfer, A. W., & Dray, L. (2015). Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(2), 233-243.
- [2] Hashish, M., & Kent, W. A. (2013, September). Trimming of CFRP aircraft components. In *Proceeding of the 2013 WJTA-IMCA Conference and Expo, Houston, USA* (pp. 9-11).
- [3] M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., Kappmeyer, G., ... & Sim, W. M. (2015). High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals*, 64(2), 557-580.
- [4] Miller, J., Eneyew, E. D., & Ramulu, M. (2013). Machining and drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites. *SAMPE Journal*, 49(2), 36-46.
- [5] Mathivanan, N. R., Mahesh, B. S., & Shetty, H. A. (2016). An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates. *Measurement*, 91, 39-45.
- [6] Ghalme, S., Mankar, A., & Bhalerao, Y. J. (2016). Parameter optimization in milling of glass fiber reinforced plastic (GFRP) using DOE-Taguchi method. *SpringerPlus*, 5(1), 1376.
- [7] Jenarthanan, M. P., & Naresh, N. (2015). Process parameters optimization on machining force and delamination factor in milling of GFRP composites using grey relational analysis. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 22, 313-320.
- [8] Dash, S., Routara, B. C., & Nayak, R. K. (2017). Optimization of process parameters in milling of TiO₂ filled GFRP composite. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3023-3032.
- [9] Razfar, M. R., & Zadeh, M. Z. (2009). Optimum damage and surface roughness prediction in end milling glass fibre-reinforced plastics, using neural network and genetic algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(6), 653-664.
- [10] Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites—a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258-1275.
- [11] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group
- [12] Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., & Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(1), 133-145.