

A szálvágási szög és forgácsolásindukált sorja közötti összefüggés vizsgálata szénszálerősítésű polimer kompozitban

Analysis of the relationship between fibre cutting angle and machining-induced burr in carbon fibre-reinforced polymer composites

MAGYAR Gergely¹, Dr. GEIER Norbert¹

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gyártástudomány és -technológia Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., T épület 4. em., Tel.: 06/1-463-2515, Fax: 06/1-463-3176,
E-mail: magyar.gergely@edu.bme.hu, Honlap: <http://manuf.bme.hu>

Abstract

The fibre cutting angle, determined by the direction of the cutting speed and the direction of the reinforcement fibres, has a significant impact on the quality of the drilled unidirectional carbon fibre-reinforced polymer (UD-CFRP) composites. A deeper understanding of the relationship between the occurrence of drilling-induced burrs and the fibre cutting angle is necessary to develop advanced drilling processes. A method based on digital image processing has been developed to determine this relationship and describe it with functions. The results suggest that the closer the fibre cutting angle to $\sim 100^\circ$, the larger the probability of burr occurrence.

Keywords: CFRP, burr, unidirectional reinforcement structure, digital image processing, drilling

Kivonat

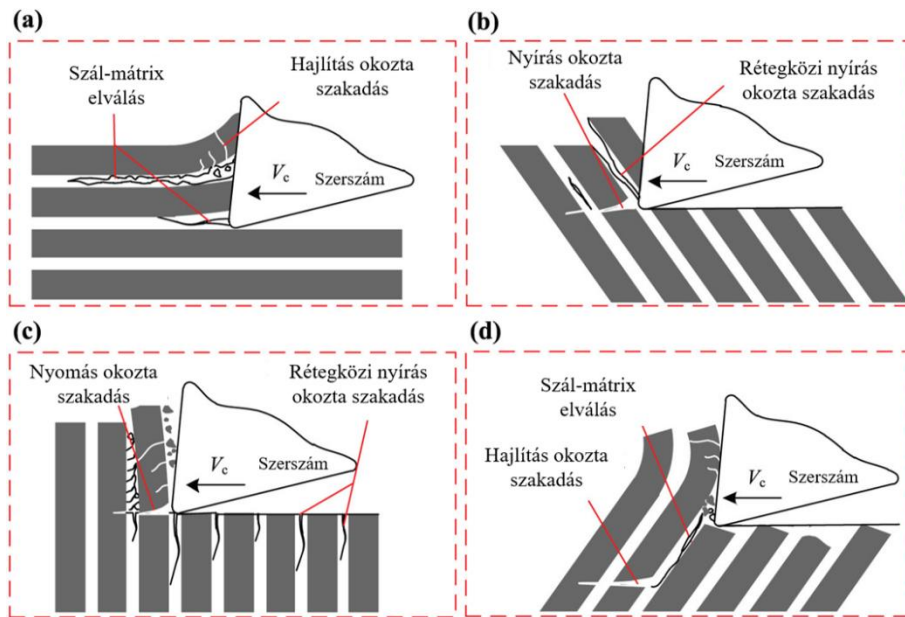
Az egyirányban szénszállal erősített polimer (UD-CFRP) kompozit anyagok fúrása során, a forgácsolási sebesség iránya és az erősítőszálak iránya által meghatározott, szálvágási szög jelentős hatással van az elkészült alaksajátosság minőségére. Korszerű forgácsolási eljárások kidolgozása érdekében, szükséges a forgácsolásindukált sorja előfordulása és a szálvágási szög közötti kapcsolat mélyebb ismerete. Erre a célra kidolgoztunk egy digitális képfeldolgozáson alapuló eljárást, amivel ez a kapcsolat függvényekkel leírható. Az előzetes eredmények azt sugallják, hogy minél közelebb van a szálvágási szög a kritikus 100° -hoz, annál nagyobb a sorja keletkezésének valószínűsége.

Kulcsszavak: CFRP, sorja, egyirányú erősítőstruktúra, digitális képfeldolgozás, fúrás

1. BEVEZETÉS

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozit anyagok forgácsolása során a sorja keletkezése fokozott veszélyeket rejt magába hiszen, ha nem kerül eltávolításra a szerkezet használata során könnyen az anyag rétegei közötti elváláshoz, szélsőséges esetben az eszköz tönkremeneteléhez vezethet [1-3]. A forgácsolásindukált sorja keletkezésének egyik oka a CFRP anyag irányfüggő tulajdonságaiban rejlik. A forgácsolási sebesség (v_c) iránya és a szálerősítés iránya által meghatározott szálvágási szög (θ) függvényében eltérő forgácsképződési mechanizmusok jellemzik a forgácsolást, melyet az 1. ábra mutat be [4]. A szálvágási szög és a forgácsolásindukált sorja előfordulásának gyakorisága közötti kapcsolat jellemzésére még nincsenek általánosan alkalmazható modellek a szakirodalomban. Annak érdekében, hogy a szálvágási szög és a forgácsolásindukált sorja előfordulásának gyakorisága közötti kapcsolatot jellemezni tudjuk korábbi kísérleti adatok [5] –furatokról készített képfelvételek– segítségével létrehoztunk egy digitális képfeldolgozáson (DIP) alapuló eljárást, amivel a készült furatokon meghatározható, hogy az adott szálvágási szög tartományhoz mennyi forgácsolásindukált sorja tartozik. A kísérletek során egyirányban erősített (UD) struktúrájú CFRP-t vizsgáltunk. A meghatározott szálvágási szög-sorja előfordulás adatsorokat a normális eloszlás sűrűségfüggvényével (GAUSS), harmadfokú (POLI3) és negyedfokú polinomiális (POLI4), illetve

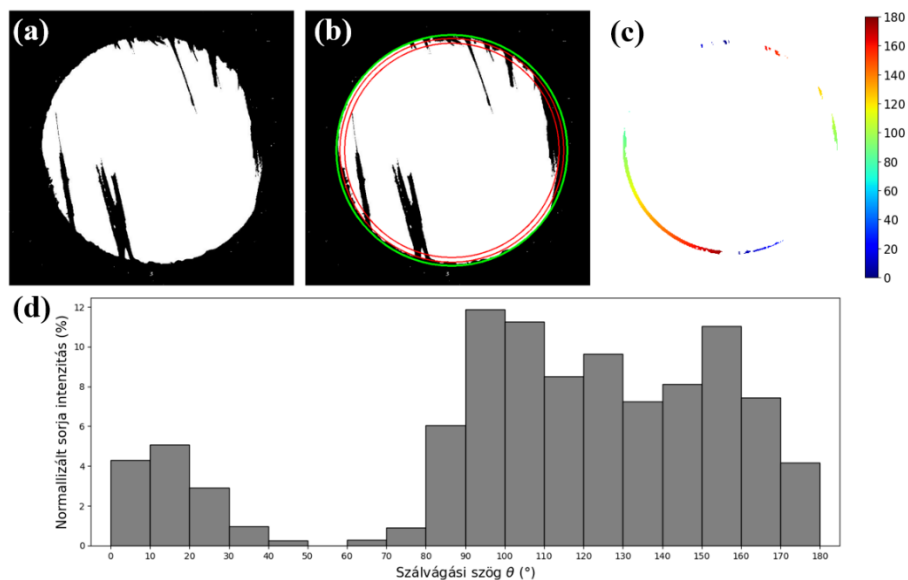
trigonometrikus (SIN) függvényekkel modelleztük, illetve ezen függvények illeszkedését vizsgáltuk a determinációs együttható (r^2) és a normalizált átlagos négyzetes gyökeltérés (NRMSE) meghatározásával.



1. ábra. Jellemző szálvágási mechanizmusok a) $\theta=0^\circ$, b) $\theta=45^\circ$, c) $\theta=90^\circ$ és d) $\theta=135^\circ$ szálvágási szög esetén [6].

2. ALKALMAZOTT MÓDSZER

Az eljárás kidolgozásához korábbi kísérletek során UD-CFRP anyagban készített 13 darab furatot ábrázoló képfelvételeket használtunk, melynek további részletei az alábbi publikációban kerültek részletezésre [5]. Az elkészült képeken először egy digitális képfeldolgozási folyamatot végeztünk Python programozási környezetben, hogy meghatározzuk az adott szálvágási szögtartományokhoz tartozó forgácsolásiindukált sorja mennyiségét. Az algoritmus lépései rendre (i) kép beolvasása, (ii) kép binarizálása, (iii) nominális furatkontúr illesztése, (iv) nominális furatmérethez képesti $95\pm 2\%$ -os tartomány (vizsgálati régió) megtartása, (v) szálvágási szögmátrix meghatározása, (vi) vizsgálati régió és szögmátrix összeszorozása és (vii) szálvágási szög-sorjaelőfordulás intenzitás eloszlás meghatározása. Az algoritmus főbb lépéseit szemléltet a 2. ábra.



2. ábra. A képfeldolgozási algoritmus főbb lépései: a) kép beolvasása (i) lépés, b) nominális furatkontúr illesztése (iii) lépés, c) vizsgálati régió és szálvágási mátrix összeszorozása (vi) lépés és d) szálvágási szög-sorjaelőfordulás intenzitás eloszlás meghatározása (vii) lépés

Az egyes furatokra meghatározott vizsgálati régióban elhelyezkedő képpontok értékét összegeztük, majd meghatároztunk egy egész adathalmazt jellemző hisztogramot. Ezután erre a hisztogramra illesztettünk normális eloszlás szerinti, harmadfokú és negyedfokú polinomiális és trigonometrikus sűrűségfüggvényeket. Az illesztés során előfordult, hogy a függvény negatív értéket vett fel, azonban mivel ez a valóságban nem fordulhat elő, az illesztett függvényeken egy rektifikált lineáris egységet (ReLU) alkalmaztunk, amely a negatív értékekhez 0-t, a függvény többi részéhez pedig függvény eredeti értékét rendeli. Az illesztett függvények pontosságának jellemzésére meghatároztuk a determinációs együtthatót (r^2) és a normalizált átlagos négyzetes gyökeltérést (NRMSE), mely mérőszámok meghatározásához a 1) és 2)-es képleteket alkalmaztuk.

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{N}}}{y_{max} - y_{min}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2)$$

Ahol, r^2 a determinációs együtthatót, SSE az eltérés négyzetösszeget, SST a teljesnégyzetösszeget, $NRMSE$ a normalizált átlagos négyzetes gyökeltérést, $RMSE$ az átlagos négyzetes gyökeltérést y_{max} a mért adathalmaz maximumát, y_{min} a mért adathalmaz minimumát, y_i a mért eloszlás értékét, \bar{y}_i az illesztett függvény értékét, míg N a minta darabszámát jelöli.

3. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálat eredményéül szolgáló összegzett szálvágási szög-sorjaelőfordulás eloszlás és az illesztett függvények a vizuális formában a 3. ábrán figyelhetők meg, függvények illeszkedését jellemző r^2 és $NRMSE$ mérőszámok értékei az 1. táblázatban olvashatók, míg az illesztett függvények a 3-6)-os képletekben kerülnek közlésre.

A különböző illesztett függvényekhez tartozó r^2 és $NRMSE$ értékek 1. táblázat

	GAUSS	POLI3	POLI4	SIN
r^2	0,8920	0,9061	0,9615	0,94448
$NRMSE$ (%)	12,50	11,75	7,52	9,01

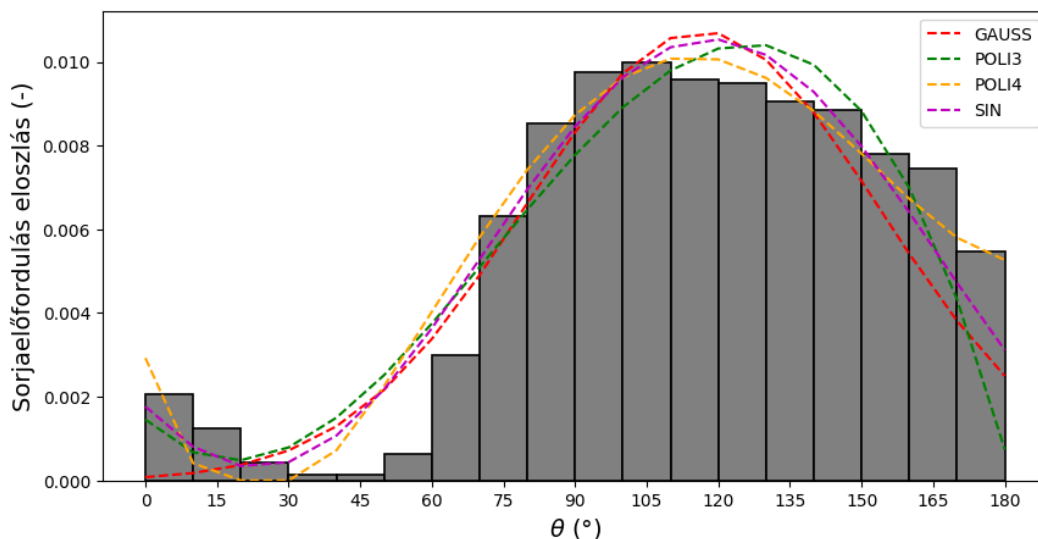
$$f_{GAUSS}(\theta) = \max \left(0, \frac{e^{-\frac{(\theta-116.5108)^2}{2 \cdot 37.1774^2}}}{37.1774 \cdot \sqrt{2\pi}} \right) \quad (3)$$

$$f_{POLI3}(\theta) = \max (0, -1,5761 \cdot 10^{-8}\theta^3 + 3,4311 \cdot 10^{-6}\theta^2 - 1,1089 \cdot 10^{-4}\theta + 1,4539 \cdot 10^{-3}) \quad (4)$$

$$f_{POLI4}(\theta) = \max (0, 1,8045 \cdot 10^{-10}\theta^4 - 7,7115 \cdot 10^{-8}\theta^3 + 1,002 \cdot 10^{-5}\theta^2 - 3,4403 \cdot 10^{-4}\theta + 0,0029264) \quad (5)$$

$$f_{SIN}(\theta) = \max (0, -0,0051 \cdot \sin(2\pi \cdot 0,0052\theta + 0,7983) + 0,0054) \quad (6)$$

Az előzetes várakozások alapján egy normális eloszlásnak megfelelő sűrűségfüggvény illeszkedését vártuk, hiszen a szálvágási mechanizmusok a kritikus területtől távolodva egyre kedvezőbbek mindkét szálvágási szögtartomány irányába indulva. Az eredmények, azonban azt mutatták, hogy az adatsor nem normális eloszlásnak megfelelő, így csupán 0,8920-es értékű determinációs együtthatóval rendelkező függvényt sikerült illeszteni az adathalmazra. A polinomiális függvények közül a negyedfokú függvénnyel sikerült jobb minőségű illesztést végezni, amely az összes függvény közül a legkedvezőbb 0,9615-os determinációs együtthatójú és 7,52 %-os normalizált négyzetes gyökeltérés értékkel sikerült a függvényillesztés. A polinomiális függvények kiértékelése során meghatároztunk egy trigonometrikus függvénnyel történő illesztést, azonban nem sikerült a korábbiaknál pontosabb illesztést végezni. Az eredmények alapján a polinomiális negyedfokú polinomiális függvénnyel tudjuk a legjobban leírni a szálvágási szög és a sorja előfordulásának valószínűsége közötti kapcsolatot UD-CFRP kompozit anyag fúrása során.



3. ábra. Összegzett sorjaelőfordulás eloszlás diagram és az illesztett függvények együttes ábrázolása.

Eredményeink közvetlenül hasznosíthatók egy furatpozíció optimalizálási algoritmus fejlesztése során, amellyel kvázi-véletlenszerű irányítottságú, rövid, vágott szálas erősítőstruktúrával rendelkező CFRP kompozit korszerű forgácsolási folyamatát hozzuk létre [7]. Az említett erősítési struktúrában az egyedi erősítőszálkötegek külön-külön egy UD erősítésnek feleltethetők meg saját iránnyal és pozícióval, így az optimalizálási célfüggvényben a jelen kutatásban meghatározott illesztett függvények alkalmazhatók. Az újonnan meghatározott függvények használata mellett várhatóan nagyobb pontossággal lehetséges a furaton jelentkező sorja helyének és mennyiségének előrejelzése.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Mivel az UD-CFRP kompozitok fúrása során jelentkező sorja előfordulása és a szálvágási szög közötti kapcsolatot leíró függvények nem ismertek, ezért egy digitális képfeldolgozáson alapuló eljárást fejlesztettünk ki, hogy korábbi kísérleti adatokon az eloszlást meg tudjuk határozni. A furatonként meghatározott eredményeket összegeztük és a teljes adatsort jellemző eloszlás adatokra normális eloszlásnak megfelelő, harmadfokú és negyedfokú polinomiális és trigonometrikus sűrűségfüggvényeket illesztettünk. Az függvényillesztés minőségét az r^2 és $NRMSE$ mérőszámok meghatározásával jellemeztük, melyek értelmezése során meghatároztuk, hogy a vizsgált tényezők közötti kapcsolat jelen kísérletek során legjobban egy negyedfokú polinomiális függvénnyel írható le. Kutatásunk következő lépései, hogy újonnan elvégzett kísérletekkel validáljuk a meghatározott függvényeinket, továbbá a sikeres validáció után a legjobban illeszkedő függvényt felhasználjuk egy furatforgácsolás során várható sorja előrejelzésre alkalmas modell fejlesztésénél.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás az Európai Unió által támogatott EPIC 739592 azonosítójú H2020 projekt támogatásnak köszönhetően valósult meg, valamint a Magyar Tudományos Akadémia által finanszírozott, BO/00508/22/6 számú Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, valamint az Innovációs és Technológiai Minisztérium által finanszírozott Új Nemzeti Kiválóság Program ÚNKP-23-3-I-BME-261 számú ösztöndíj támogatásával készült. A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közös támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] D. I. Poór, N. Geier, C. Pereszlai, és J. Xu, „A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges”, *Composites Part B: Engineering*, köt. 223, o. 109155, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109155>.
- [2] W. Liu, X. Qin, S. Li, és X. Wang, „Experimental research on the matrix cracks and delamination distribution and their monitoring methods during drilling UD-CFRP”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 130, sz. 3, o. 1595–1615, jan. 2024, doi: [10.1007/s00170-023-12733-y](https://doi.org/10.1007/s00170-023-12733-y).
- [3] F. Wang, X. Wang, X. Zhao, G. Bi, és R. Fu, „A numerical approach to analyze the burrs generated in the drilling of carbon fiber reinforced polymers (CFRPs)”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 106, sz. 7, o. 3533–3546, febr. 2020, doi: [10.1007/s00170-019-04872-y](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04872-y).
- [4] G. Magyar, D. Károly, J. Xu, és N. Geier, „Analysis of drilling-induced geometrical damages in basalt and carbon fibre-reinforced polymer (BFRP and CFRP) composites”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 123, sz. 1, o. 357–372, nov. 2022, doi: [10.1007/s00170-022-10173-8](https://doi.org/10.1007/s00170-022-10173-8).
- [5] N. Geier, T. Szalay, és 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*, köt. 100, sz. 9–12, o. 3139–3154, febr. 2019, doi: [10.1007/s00170-018-2895-8](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2895-8).
- [6] C. Wang, L. Wen, W. Ming, Q. An, és M. Chen, „Experimental study on effects of fiber cutting angle in milling of high-strength unidirectional carbon fiber-reinforced polymer laminates”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, köt. 232, sz. 10, o. 1813–1824, aug. 2018, doi: [10.1177/0954405416679868](https://doi.org/10.1177/0954405416679868).
- [7] N. Geier, G. Póka, Á. Jacsó, és 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*, köt. 242, o. 110054, aug. 2022, doi: [10.1016/j.compositesb.2022.110054](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110054).