

Tengelyirányú forgácsolóerő elemzése Al/UD-CFRP szerkezetek fúrása során

Analysis of axial cutting force during drilling of Al/UD-CFRP structures

Markó Balázs^{1,2}, Dr. Geier Norbert¹

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

²Neumann János Egyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Anyagok és Járművek Tanszék, 6000 Kecskemét, Izsáki út 10., 8. épület, Tel.: 06/76-123-456, Fax: 06/76-123-457, E-mail: info@nje.hu, Honlap: <https://ijat.hu>

Abstract

During the drilling of metal and fibre-reinforced polymer composite structures, different cutting mechanisms occur due to distinct material properties, which justifies the investigation of machining-related differences between the two layers. The aim of the study was to analyse how the magnitude and variation of the axial cutting force in Al/CFRP stacks depend on the investigated process parameters. The varied factors were feed, cutting speed, and stacking sequence. The results show that the axial force component is primarily influenced by feed, while the other factors have no significant effect. However, the stacking sequence significantly affects the normalised force variation of the UD-CFRP layer, where the UD-CFRP/Al configuration resulted in an average 43% lower value, indicating improved drilling stability.

Keywords: Al/CFRP stack, drilling, cutting force, cutting sequence, feed

Kivonat

A fém és szálereősített polimer kompozit szerkezetek furatkészítése során eltérő forgácsolási mechanizmusok érvényesülnek, ezért indokolt a két lemez közötti különbségek forgácsolási jellemzőinek vizsgálata. A kutatás célja annak elemzése volt, hogy Al/CFRP szerkezetek esetén a tengelyirányú forgácsolóerő nagysága és szórása miként függ a vizsgált folyamatparaméterektől. A kísérletek során variált faktorok az előtolás, a forgácsolási sebesség és a rétegsorrend voltak. Az eredmények alapján a tengelyirányú erőkomponenst elsősorban az előtolás befolyásolja, míg a többi faktor hatása nem szignifikáns. A rétegsorrend ugyanakkor jelentősen hat az UD-CFRP lemez normalizált szórására, ahol az UD-CFRP/Al sorrend átlagosan 43%-kal kisebb értéket eredményezett, ami a furatkészítés stabilitása szempontjából kiemelt jelentőségű.

Kulcsszavak: Al/CFRP szerkezet, fúrás, forgácsolóerő, rétegsorrend, előtolás

1. BEVEZETÉS

Napjainkban az alumínium (Al) ötvözetek és a szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok kombinációja (továbbiakban Al/CFRP szerkezetek) egyre gyakoribb megoldássá válik, mivel ezen hibrid anyagok nagy fajlagos szilárdságot, kedvező merevséget és jelentős súlymegtakarítást biztosítanak olyan iparágak számára, mint a repülőgép-, gépjármű- és hajóipar [1]. Ugyanakkor ezeknek a különböző mechanikai tulajdonságú szerkezeteknek az együttes megmunkálása komoly technológiai kihívást jelent, mivel eltérő forgácsolási mechanizmusok érvényesülnek a fém és a kompozit rétegben egyaránt [2], [3].

Gyakran szükség van az Al/CFRP szerkezetekben furatok készítésére, mivel ezen szerkezetek rögzítése sok esetben csavar- vagy szegecskötéssel történik [4]. Azonban furatok készítése során számos hibajelenség felmerül, amely nagy mértékben rontja ezen szerkezetek minőségét [5]. A sorjaképződés

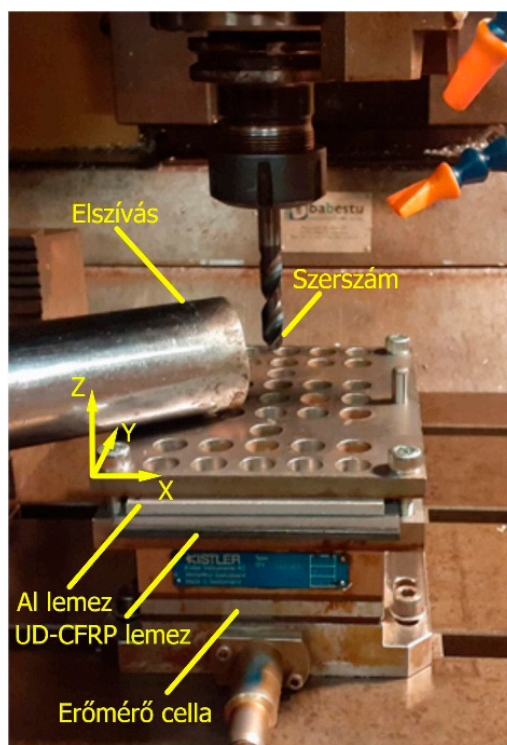
mindkét lemezben előfordulhat, míg a delamináció és a szállítóredezés a CFRP réteg inhomogén és anizotróp szerkezetéből adódóan kizárólag ott jelentkezik, ami szükségessé teszi ezen hibajelenségekre hatással lévő jellemzők részletes vizsgálatát [6]. A tengelyirányú forgácsolóerő-komponens nagysága és annak fluktuációja egy ilyen jellemző. Zhao és munkatársai [7] kísérleti vizsgálatukban azt találták, hogy a tengelyirányú forgácsolóerő-komponens és a furatminőséget jellemző paraméterek (Al esetén sorja és CFRP esetén delamináció) között jelentős összefüggés van, ami azt jelzi, hogy a paraméterek optimalizálása kulcsfontosságú a hibajelenségek minimalizálásához az Al/CFRP szerkezetek fúrásánál. Wang és mtsai. [8] Al/CFRP szerkezetek fúrása során vizsgálták a forgácsolási hőmérsékletet, a tengelyirányú forgácsolóerő-komponenst és a létrehozott furatminőséget. Az eredményekből látható, hogy a folyamatparaméterek esetén nem beszélhetünk azonos értéken lévő optimumról. Ez előtolás esetén jelentkezett leginkább, ahol CFRP fúrásakor általános ajánlás, hogy a kisebb előtolás kisebb forgácsolóerőket és jobb felületi minőséget eredményez, azonban az Al lemez fúrásakor ezen előtolás értékek esetén már jelentősen romlanak a forgácsolási viszonyok és ezzel a furat minősége is.

Jelen kutatás célja az volt, hogy kísérleti úton elemezze az Al/UD-CFRP szerkezetek fúrása során kialakuló tengelyirányú forgácsolóerő-komponenst és annak normalizált szórását (variációs együtthatóját), valamint feltárja ezen jelenségek kapcsolatát a folyamatparaméterekkel és a rétegsorrenddel.

2. ANYAGOK, ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Kísérleti és mérési beállítások

A furatokat egy Kondia B-640 típusú háromtengelyes CNC marógépen készítettük száraz megmunkálási körülmények mellett, ahol a forgács-elszívás egy Nilfisk GB733 típusú ipari porszívóval történt. A kísérletek során egy 10 mm átmérőjű, TIVOLY POLARIS 150 Xtreme típusú csigafurót alkalmaztunk, amely 140°-os csúcshézaggal rendelkezik. A kísérletek során 5-5 mm vastagságú AlMgSi1 alumínium ötvözetből és vinilészter mátrixú egyirányban szénszállal erősített polimer kompozitból álltak a lemezek. A tengelyirányú forgácsolóerő-komponens (F_z) mérését egy Kistler 9257B típusú erőmérő cellán végeztük 7000 Hz-es mintavételezési frekvenciával, 100 N/V erősítési tényező mellett. A mérési bizonytalanság az erőmérő cella pontosságából, a jelzajból és a rendszer merevségéből tevődik össze, azonban ezen tényezők hatása elhanyagolható volt. Az ismétlések alkalmazása és a kísérleti sorrend randomizálása lehetővé tette a véletlen hibák mérséklését és statisztikai figyelembevételét. A kísérleti környezet az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az alkalmazott kísérleti környezet

A kísérlettervezés során Central Composite Inscribed (CCI) típusú kísérlettervezési módszert alkalmaztunk a kísérleti középpont ötszöri megismétlése mellett. Mennyiségi faktorként a forgácsolási sebességet (v_c) és az előtolást (f) variáltuk öt-öt szinten, míg minőségi faktorként a lemezsorrendet két szinten variáltuk. A kísérletterv generálása a Minitab szoftverben történt a kísérleti sorrend randomizálása mellett. Az alkalmazott faktorok és azok szintjei az 1. táblázatban találhatók.

Alkalmazott faktorok és faktorszintek

1. táblázat

Faktorok	Faktorszintek				
	1	2	3	4	5
Forgácsolási sebesség v_c (m/min)	100	110,98	137,5	164,02	175
Előtolás f (mm)	0,05	0,065	0,1	0,135	0,15
Lemezsorrend S (1)	Al/UD-CFRP	UD-CFRP/Al			

2.1. Felhasznált módszerek

A kísérletből származó nyers erőmérési jelek szűrése gyors Fourier-transzformációval történt, ahol az aluláteresztő szűrő vágási frekvenciáját az 1. egyenlet alapján határoztuk meg

$$f_c = f_{\text{TPF}} - \frac{f_{\text{TPF}}}{\frac{10}{n}}, \text{ ahol} \quad (1)$$

$$f_{\text{TPF}} = \frac{z}{60} \cdot z$$

Továbbá az f_c a szűrési frekvencia, a f_{TPF} a fogátlépési frekvencia, az n a fordulatszám és z a forgácsoló élek száma. A vágási frekvencia meghatározása a szerszám kinematikai gerjesztéséhez kapcsolódó fogátlépési frekvencia alapján történt. Bár a CFRP heterogén szerkezete miatt a folyamat nem tisztán periodikus, a lokális károsodási események széles frekvenciatartományban jelennek meg, ezért jelenlegi szűrési frekvencia a CFRP fúrása során fellépő jelentős zaj leválasztását szolgálja, érdemi információvesztés nélkül. Az adatok feldolgozása során mindkét lemez esetén az állandósult szakaszban nyert erőjeleket vizsgálatát végeztük. Ezen erőjelek átlagát és normalizált szórását vizsgáljuk a továbbiakban, ahol a normalizált szórást a variációs együtthatóval jellemezzük (2. egyenlet).

$$CI = \frac{\sigma_{F_z}}{\bar{F}_z} \cdot 100 \quad (2)$$

Ahol CI a variációs együttható, σ_{F_z} az axiális erőkomponens szórása, míg \bar{F}_z az axiális erőkomponens átlaga.

3. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

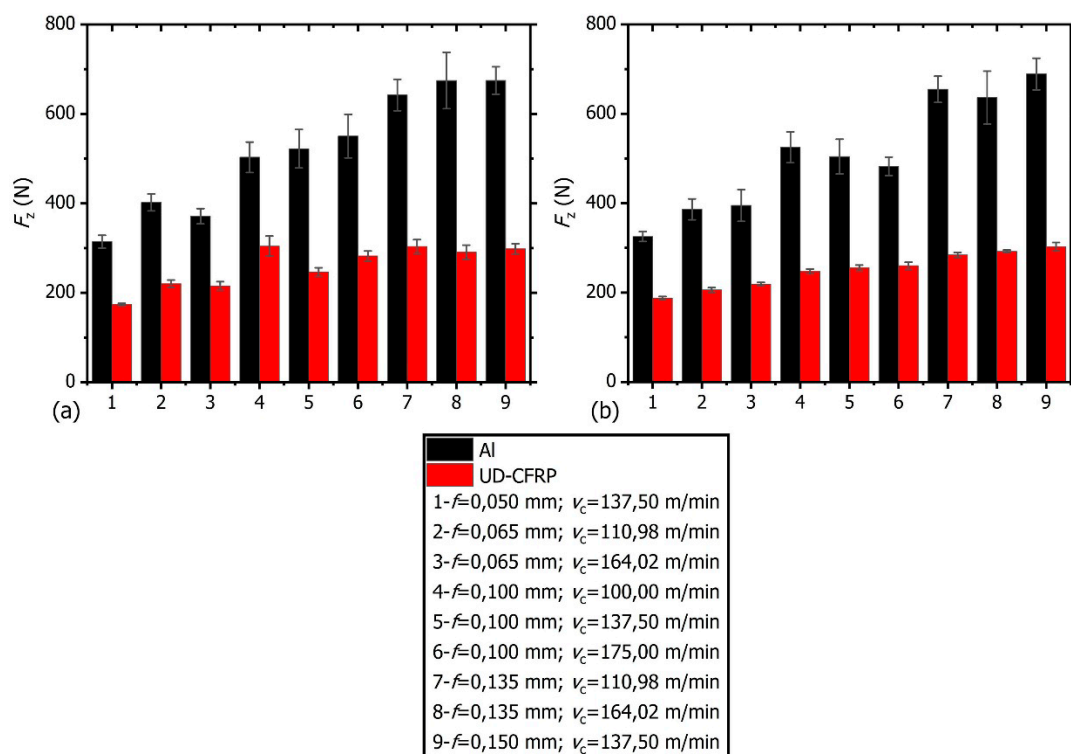
Az eredmények vizsgálatánál elsőként az állandósult szakaszban mért axiális erőkomponenseket vizsgáltuk varianciaanalízissel, amelyek a 2. táblázatban láthatók.

ANOVA táblázatok a tengelyirányú forgácsoló erőkomponensekről (F_z)

2. táblázat

Hatás	$F_{z,Al}$ (N)					$F_{z,CFRP}$ (N)				
	SS	DF	MS	F-érték	p-érték	SS	DF	MS	F-érték	p-érték
v_c	0	1	0	<0,01	0,980	5,6	1	5,6	0,02	0,880
f	269844	1	269844	696,65	<0,001	26349,6	1	26349,6	111,83	<0,001
S	633	1	633	1,63	0,217	86,5	1	86,5	0,37	0,552
$v_c \times f$	162	1	162	0,42	0,526	21,0	1	21,0	0,09	0,769
$v_c \times S$	1199	1	1199	3,09	0,095	470,3	1	470,3	2,00	0,174
$f \times S$	52	1	52	0,13	0,718	27,4	1	27,4	0,12	0,737
Hiba	7360	19	387			4476,7	19	235,6		
Összes	279249	25				31437,2	25			

A 2. táblázat alapján az előtolásnak mindkét lemez esetén jelentős hatása van az axiális forgácsolóerő-komponensre (szignifikáns hatás, $\alpha=0,05$), míg a többi faktornak nincs szignifikáns hatása az axiális erőkomponensre nézve. Ezen felül a forgácsoló sebesség és a lemezsorrend keresztthatása eredményezett még szignifikáns közel p -értéket, azonban ennek hatása nem jelentős (F -érték=3,09). A kapott tengelyirányú forgácsolóerő-komponensek értékei és azok szórásai láthatók a 2. ábrán.



2. ábra. Állandósult szakaszban mért axiális forgácsolóerő-komponensek értékei a különböző kísérleti beállításokban:
(a) Al/UD-CFRP és (b) UD-CFRP/Al lemezsorrend esetén

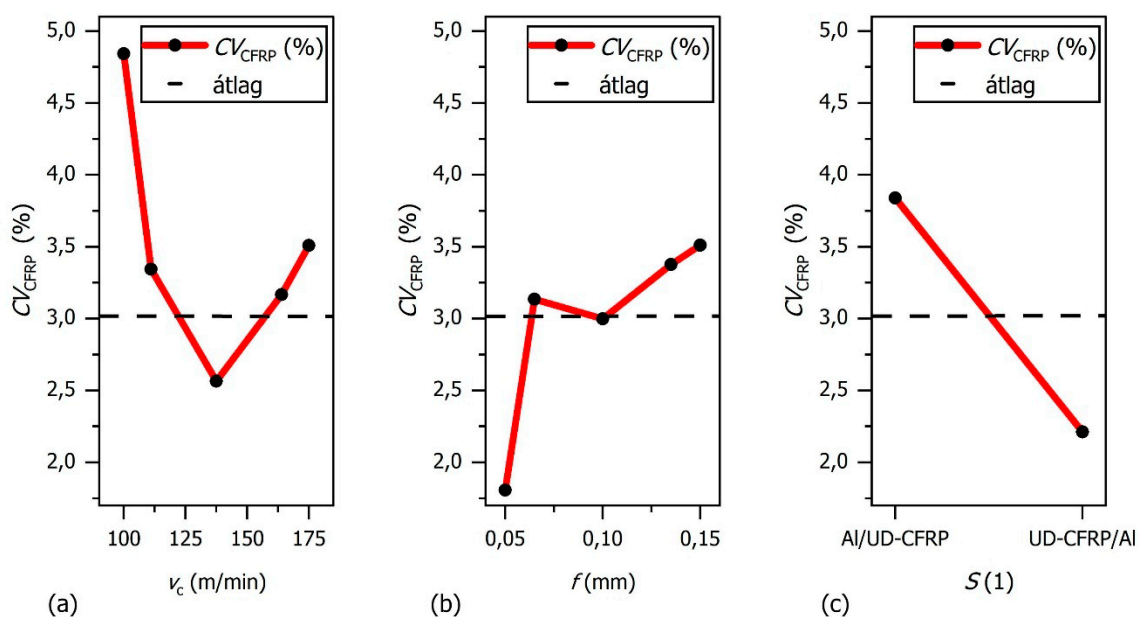
A 2. ábrán látható, hogy az Al lemez esetén mért F_z erő minden esetben jelentősen, 165-231%-kal nagyobb, mint UD-CFRP esetén. A mért erők nagyságán kívül azok szórása is fontos szempont (ennek hatása van a forgácsolási folyamat egyenletességére, stabilitására), ezért a kapott variációs együtthatókat varianciaanalízissel vizsgáljuk (3. táblázat).

ANOVA táblázatok a variációs együtthatókról (CV)

3. táblázat

Hatás	CV_{Al} (%)					CV_{CFRP} (%)				
	SS	DF	MS	F-érték	P-érték	SS	DF	MS	F-érték	P-érték
v_c	7,79	1	7,79	2,27	0,148	1,25	1	1,25	0,85	0,367
f	2,71	1	2,71	0,79	0,385	2,09	1	2,09	1,42	0,248
S	0,02	1	0,02	<0.01	0,947	17,19	1	17,19	11,69	0,003
$v_c \times f$	4,32	1	4,32	1,26	0,275	0,02	1	0,02	0,01	0,910
$v_c \times S$	0,29	1	0,29	0,09	0,773	0,88	1	0,88	0,60	0,450
$f \times S$	1,11	1	1,11	0,32	0,577	1,70	1	1,70	1,15	0,296
Hiba	65,09	19	3,43			27,94	19	1,47		
Összes	81,33	25				51,07	25			

A 3. táblázat alapján látható, hogy egyedül a lemezsorrendnek van szignifikáns hatása variációs együtthatóra UD-CFRP lemez esetén, míg a többi faktornak nincs szignifikáns hatása. A UD-CFRP lemez esetén kapott főhatás diagrammok a 3. ábrán láthatók.



3. ábra. UD-CFRP lemez esetén kapott variációs együtthatók főhatás diagramjai:
(a) forgácsolási sebesség, (b) előtolás és (c) rétegsorrend

A főhatás diagrammok (3. ábra) alapján látható, hogy a forgácsolási sebesség esetén a vizsgált tartomány közepén ($v_c=137,5$ m/min) tapasztalható a legkisebb normalizált szórás, míg az előtolás esetén $f=0,05$ mm értéknél, azonban ezen faktorok hatása az előzőek alapján nem adódott szignifikánsnak. A lemezsorrend esetén az UD-CFRP/AI sorrend átlagban 43%-kal kisebbnek adódtak a variációs együtthatók, mint AI/UD-CFRP lemezsorrend esetén. A jelenség háttérében feltételezhetően az eltérő rétegsorrendből adódó mechanikai viselkedés áll, mivel az UD-CFRP/AI sorrendnél a fémlemez alátámasztó hatása a CFRP fúrása során csökkenti a szálkitépések és az instabil forgácsképzés mértékét [9]. Ezzel szemben az AI/UD-CFRP lemezsorrendnél a CFRP kilépési oldalon történő megmunkálása miatt a szálak alátámasztása csökken, ami fokozza a szálkihúzódas, delamináció és lokális törési jelenségek kialakulását [4]. Ez a nem egyenletes anyagleválasztás időben változó ellenállást eredményez, ami nagyobb mértékű erőfluktuációként jelenik meg a mért jelekben. Ennek következtében a lemezsorrend hatása meghatározóbbnak tekinthető a vizsgált tartományban, mint az egyes technológiai paramétereké.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során AI/UD-CFRP szerkezetek fúrását vizsgáltuk, különös tekintettel az állandósult forgácsolási szakaszban kialakuló tengelyirányú forgácsolóerő-komponensre, valamint annak relatív fluktuációját jellemző variációs együtthatóra. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az előtolás szignifikáns hatással ($\alpha = 0,05$) van az axiális forgácsolóerő-komponensre, míg a vizsgált tartományban a forgácsolási sebesség és rétegsorrend hatása nem bizonyult statisztikailag szignifikánsnak. A tengelyirányú erőkomponens normalizált szórását jellemző variációs együttható elemzése ugyanakkor eltérő tendenciát mutatott. A CFRP forgácsolása során mért axiális erő esetében a vizsgált technológiai paraméterek közül kizárólag a rétegsorrend hatása bizonyult szignifikánsnak. Az UD-CFRP/AI rétegsorrend átlagosan 43%-kal kisebb variációs együtthatót eredményezett az AI/UD-CFRP rétegsorrendhez képest, ami a forgácsolási folyamat kedvezőbb stabilitására utal. Az eredmények rámutattak arra, hogy az AI/CFRP szerkezetek fúrása során a forgácsolási folyamat jellemzésében, különösen a CFRP megmunkálása során a rétegsorrendnek jelentős hatása van. Ezért annak figyelembevétele elengedhetetlen a technológiai paraméterek optimalizálásakor és a forgácsolási stabilitás biztosítása érdekében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2024-1.2.5-TÉT-2024-00032, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott EKÖP-25-3-BME-103 kódú támogatásnak köszönhetően valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Q. An, B. Zhong, X. Wang, H. Zhang, X. Sun, és M. Chen, „Effects of drilling strategies for CFRP/Ti stacks on static mechanical property and fatigue behavior of open-hole CFRP laminates”, *J. Manuf. Process.*, köt. 64, o. 409–420, ápr. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.01.036.
- [2] N. Tamil Alagan és mtsai., „Investigation of the quality of Al-CFRP stacks when drilled using innovative approaches”, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, köt. 43, o. 260–272, júl. 2023, doi: 10.1016/j.cirpj.2023.04.011.
- [3] B. Markó, S. Seprós, J. Xu, és N. Geier, „Effective suppression of machining-induced interlayer damage in machined holes of Al/CFRP stacks”, *Composites Part C: Open Access*, köt. 17, o. 100627, júl. 2025, doi: 10.1016/j.jcomc.2025.100627.
- [4] J. Min és mtsai., „Fabrication processes of metal-fiber reinforced polymer hybrid components: a review”, 2022. június 1., *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s42114-021-00393-z.
- [5] L. Zhang, Z. Liu, W. Tian, és W. Liao, „Experimental studies on the performance of different structure tools in drilling CFRP/Al alloy stacks”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, köt. 81, sz. 1–4, o. 241–251, okt. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6955-z.
- [6] J. Joy Mathavan, M. H. Hassan, J. Xu, és G. Franz, „Hole Quality Observation in Single-Shot Drilling of CFRP/Al7075-T6 Composite Metal Stacks Using Customized Twist Drill Design”, *Journal of Composites Science*, köt. 6, sz. 12, dec. 2022, doi: 10.3390/jcs6120378.
- [7] M. Zhao, F. Wang, R. Fu, K. Sun, C. Du, és J. Cui, „Drilling study on CFRP/Al stack with different CFRP thickness using chip-breaking step drill bit”, *J. Manuf. Process.*, köt. 90, o. 300–309, márc. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.050.
- [8] C. Y. Wang, Y. H. Chen, Q. L. An, X. J. Cai, W. W. Ming, és M. Chen, „Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, köt. 16, sz. 8, o. 1689–1697, jún. 2015, doi: 10.1007/s12541-015-0222-y.
- [9] J. H. Ahn, G. Kim, és B. K. Min, „Exit delamination at the material interface in drilling of CFRP/metal stack”, *J. Manuf. Process.*, köt. 85, sz. 1, o. 227–235, jan. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.058.