

Forgácsolásindukált rétegeközi sorja kísérleti vizsgálata Al/CFRP szendvicsszerkezetekben

Experimental investigation of machining-induced interlayer burr in Al/CFRP sandwich structures

MARKÓ Balázs¹, Dr. GEIER Norbert¹

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

Abstract

Metal and fiber-reinforced polymer composite sandwich structures have significantly different machinability properties. Different cutting mechanisms occur at the same time between the layers, which causes cutting failure phenomena (delamination, burr formation). The main goal of our research is to investigate the effect of the technological parameters and the axial cutting force component on the geometric characteristics of the interlayer burr. The effect of feed and cutting speed on the maximum burr height and burr thickness was investigated using analysis of variance (ANOVA). The ANOVA results show that the feed has a significant effect on the axial cutting force component. However, the maximum burr height and burr thickness are not significantly affected by feed, cutting speed, or the axial cutting force component. The results suggest that the interlayer burr can only be influenced to a small extent by varying the process parameters.

Keywords: Drilling; Sandwich structure; Burr; Burr height; Burr thickness

Kivonat

A fém és szálerepített polimer kompozit alkotta szendvicsszerkezetek eltérő forgácsolhatósági tulajdonsága miatt a rétegekben (két lemez találkozásánál) különböző forgácsolómechanizmusok jelentkeznek egyidőben, ezért itt több forgácsolásindukált hibajelenség (delamináció, sorjaképződés) is felmerülhet. A kutatásunk fő célja a technológiai paraméterek és a tengely irányú fogácsoló erőkomponens hatásának vizsgálata a rétegeközi sorja geometriai jellemzőire. Az előtolás és a forgácsolási sebesség hatását vizsgáltuk a maximális sorjamagasságra és a sorjavastagságra varianciaanalízis (ANOVA) segítségével. Az ANOVA eredmények azt mutatják, hogy az előtolásnak szignifikáns a hatása a tengely irányú forgácsolási erőkomponensre. A maximális sorjamagasságra és a sorjavastagságra azonban nincs szignifikáns hatással sem az előtolás, a forgácsolási sebesség, sem a tengely irányú forgácsolási erőkomponens. Az eredmények azt sejtetik, hogy a rétegeközi sorja csak kis mértékben befolyásolható a folyamatparaméterek variálásával.

Kulcsszavak: Fúrás; Szendvicsszerkezet; Sorja; Sorjamagasság; Sorjavastagság

1. BEVEZETÉS

A fém és polimer kompozit szendvicsszerkezetek közül a leggyakrabban használt az Al/CFRP, ami többek között a kiváló fajlagos szilárdságának köszönhető [1]. Ezen összetett anyagok furatforgácsolása során nem csak a be- és kilépő oldalon figyelhetőek meg a forgácsolásindukált hibajelenségek hanem rétegekben is [2]. A fellépő hibajelenségek közül a delaminációt és a sorjaképződést vizsgálja számos publikáció [3-5].

A sorja eltávolítása akár a gyártási költségek 30%-át is kiteheti nagyobb pontosságú hagyományos alkatrészeken [6], mely magasabb költségekkel is járhat szendvicsszerkezetekben rétegeközi sorja esetén (szétszerelési költség miatt) [3]. Ezért nagy fontossággal bír a rétegeközi sorja minimalizálása. Számos publikációban nagyobb figyelmet fordítanak a CFRP lemez rétegeközi oldalán jelentkező hibákra. Itt legtöbb esetben a delamináció jelentős [4-5].

Abdelhafeez Hassan és mtsai. [3] fém és polimer kompozit szendvicsszerkezeteknél vizsgálták a rétegeközi és a kilépő sorját a fémlemenzen. Egy analitikus sorjaprediktáló módszert dolgoztak ki, amivel 20%-

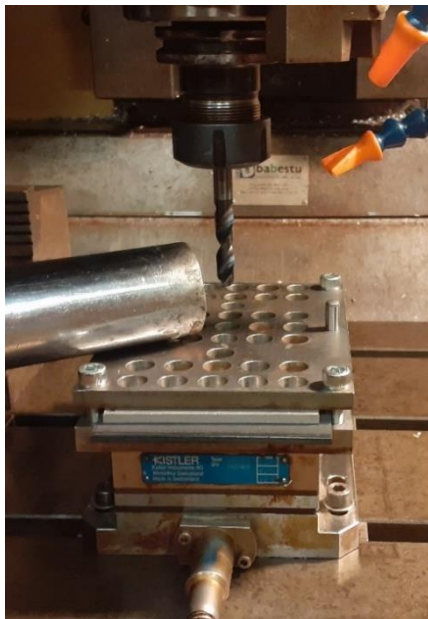
os relatív hibával jósolható a sorjamagasság és a sorjavastagság. Az alkalmazott módszer a szerszámgeometria és a munkadarab anyaga alapján ad becslést a sorjageometriára. Egy másik kutatásban Advith és mtsai [7] Al/CFRP szendvicsszerkezeteknél végeztek fúrási kísérleteket, ahol többek között vizsgálták az alumínium lemezen a forgácsolási indukált sorját a kilépő oldalon. Az elvégzett varianciaanalízis alapján a fordulatszámnak és az előtolásnak is szignifikáns hatása van a keletkezett sorját jellemző sorjamagasságra és sorjavastagságra.

Figyelembevéve az Al/CFRP szendvicsszerkezetek rétegek közötti forgácsolhatóságával kapcsolatos hiányos eredményeket, jelen kutatás fő célja a rétegek közötti sorja kísérleti vizsgálata ezen összetett szerkezetekben.

2. KÍSÉRLETI ÉS MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A fúrási kísérleteket alumínium és szénszállal erősített polimer kompozit szendvicsszerkezeteken végeztük. A fémlemez AlMgSi1 alumínium ötvözet, míg a kompozit lemez vinilészter mátrixú egyirányban szénszállal erősített polimer kompozit (UD-CFRP) volt. A fúrókészülékben csavarkötéssel rögzítettük egymáshoz az egyenként 5 mm vastagságú lemezeket. A kísérleteket egy Kondia B-640 típusú háromtengelyes marógépen végeztük egy Ø10-es TIVOLY POLARIS 150 Xtreme típusú csigafúróval. A kísérlet szárazmegmunkálási körülmények között történt, ahol a forgács elszívása egy Nilfisk GB733 típusú ipari porszívóval történt. A kísérlet során az erőméréshez egy Kistler 9257B típusú erőmérőt használtunk, aminek mérési frekvenciáját 7 kHz-re vettük fel.

A kísérletet követően a sorja mérését minden esetben az alumínium lemezen végeztük rétegek között. A mérés egy Keyence VR-5000 típusú profilméterrel történt, aminek mérési pontossága $\pm 2,5 \mu\text{m}$, míg ismétlési pontossága $\pm 0,4 \mu\text{m}$. Minden furatot 9 mérési irányban vizsgáltunk egymástól 20° -onkénti eltéréssel. A kísérleti és mérési környezet az 1. ábrán látható.



(a)



(b)

1. ábra. (a) Kísérleti- és a (b) mérési környezet

A kísérlettervezést Central Composite Inscribed (CCI) kísérlettervezési módszerrel végeztük a Minitab szoftverben. Mennyiségi faktorként a forgácsolási sebességet (v_c) és az előtolást (f) variáltuk, míg kategória faktorként a lemezrendet variáltuk. A vizsgált faktorként és faktorszintek az 1. táblázatban láthatóak.

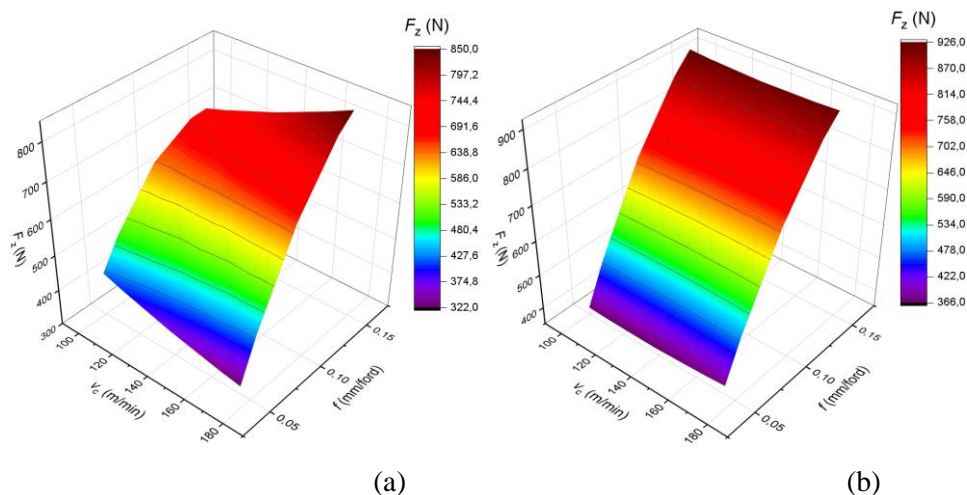
Mennyiségi faktorként és faktorszintek

1. táblázat

Mennyiségi faktorként		Faktorszintek				
		1	2	3	4	5
Forgácsolási sebesség	v_c (m/min)	100	114,65	150	185,36	200
Előtolás	f (mm)	0,05	0,065	0,1	0,135	0,15
Lemezrend	S (1)	Al/UD-CFRP	UD-CFRP/Al			

3. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Elsőként a forgácsolási sebesség (v_c) és az előtolás (f) hatását vizsgáltuk a tengely irányú forgácsoló erőkomponensre. Az UD-CFRP/Al lemezsorrend esetén minden esetben a maximális tengely irányú forgácsolási erőkomponenst a csigafúró fémlemezbe való belépésekor kaptuk, míg az Al/UD-CFRP lemezsorrend esetén jellemzően az alumínium lemezben „állandósult” forgácsolási viszonyok mellett. A faktorok hatását, illetve a mért értékekre illesztett válaszfelületet szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra. Erőmérési eredmények: (a) Al lemez felül, (b) Al lemez alul

A varianciaanalízis (ANOVA) alapján az előtolásnak (f) van szignifikáns hatása 95%-os szignifikancia intervallum mellett a tengely irányú forgácsoló erőkomponensre. Az előtolás növelésnek közvetlen hatása van a forgácskeresztmetszet növelésére, ami a forgácsolási erő növekedésében realizálódik. A forgácsolási sebesség P-értéke mindkét lemezsorrend esetén 0,5-nél nagyobbak adódtak, azaz nem tekinthető szignifikáns hatásúnak.

Ezt követően az előtolás (f), forgácsolási sebesség (v_c) és a tengely irányú erőkomponens (F_z) hatását vizsgáltuk a maximális sorjamagasságra (h_{max}) és a sorjavastagságra (b) varianciaanalízissel. A kiértékelést minden furat esetén a 20°-onként felvett 9 mérési irányban kapott maximális sorjamagasság és sorjavastagság átlagával végeztük. Al/UD-CFRP lemezsorrend esetén kapott ANOVA eredmények láthatóak a 2. táblázatban.

ANOVA táblázatok Al/UD-CFRP lemezsorrend esetén

2. táblázat

Hatás	Maximális sorjamagasságra					Sorjavastagságra				
	SS	DF	MS	F	P-érték	SS	DF	MS	F	P-érték
v_c	455,7	1	455,7	1,74	0,279	4339,4	1	4339,4	1,84	0,268
f	33,2	1	33,2	0,13	0,745	2251,8	1	2251,8	0,96	0,401
F_z	45,4	1	45,4	0,17	0,705	3316,5	1	3316,5	1,41	0,321
$v_c \times v_c$	197,8	1	197,8	0,76	0,449	102,9	1	102,9	0,04	0,848
$f \times f$	56,2	1	56,2	0,21	0,675	1024,3	1	1024,3	0,43	0,557
$F_z \times F_z$	0,14	1	0,14	<0,01	0,983	1274,3	1	1274,3	0,54	0,516
$v_c \times f$	476,8	1	476,8	1,82	0,270	4273,3	1	4273,3	1,81	0,271
$v_c \times F_z$	599,9	1	599,9	2,29	0,227	4607,0	1	4607,0	1,95	0,257
$f \times F_z$	16,2	1	16,2	0,06	0,820	1306,0	1	1306,0	0,55	0,511
Hiba	785,5	3	261,8			7073,4	3	2357,8		
Összes	2986,7	12				22557,0	12			

A 2. táblázat alapján látható, hogy a legnagyobb mértékben forgácsolási sebességnek és annak kereszt hatásainak van hatása a maximális sorjamagasságra és sorjavastagságra, de ezeknek is a P-értéke minden esetben nagyobb 0,2-nél. Így megállapítható, hogy a vizsgált faktoroknak nincs szignifikáns hatása $\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett Al/UD-CFRP lemezsorrend esetén.

Az UD-CFRP/Al lemezsorrend esetén kapott ANOVA eredmények láthatóak a 3. táblázatban.

Hatás	Maximális sorjamagasságra					Sorjavastagságra				
	SS	DF	MS	F	P-érték	SS	DF	MS	F	P-érték
v_c	269,2	1	269,2	2,87	0,189	362,1	1	362,1	0,28	0,631
f	467,4	1	467,4	4,99	0,112	71,6	1	71,6	0,06	0,828
F_z	458,4	1	458,4	4,89	0,114	86,3	1	86,3	0,07	0,811
$v_c \times v_c$	183,5	1	183,5	1,96	0,256	1169,1	1	1169,1	0,92	0,409
$f \times f$	289,0	1	289,0	3,08	0,177	23,5	1	23,5	0,02	0,901
$F_z \times F_z$	228,7	1	228,7	2,44	0,216	29,4	1	29,4	0,02	0,889
$v_c \times f$	243,9	1	243,9	2,60	0,205	268,3	1	268,3	0,21	0,677
$v_c \times F_z$	129,9	1	129,9	1,39	0,324	381,1	1	381,1	0,30	0,622
$f \times F_z$	265,9	1	265,9	2,84	0,191	22,0	1	22,0	0,02	0,904
Hiba	281,0	3	93,7			3817,9	3	1272,7		
Összes	2419,8	12				13589,3	12			

A 3. táblázat alapján látható, hogy a maximális sorjamagasság esetén volt jelentősebb a faktorok hatása, míg a sorjavastagságra minden esetben a P-érték 0,4-nál nagyobb. Ez eltérést mutat az előző lemezsorrendhez (Al/UD-CFRP) képest, mivel ott a 2. táblázat alapján látható, hogy a faktorok P-értéke közelebb esett egymáshoz, mint az UD-CFRP/Al lemezsorrend esetén. Jövőbeni munkánk egyik fő célja a rétegek közötti sorját szignifikánsan befolyásoló nem-triviális faktorok felkutatása és vizsgálata.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Több kutatás alapján fontos a fém/polimer kompozit szendvicsszerkezeteknél forgácsolásindukált sorja vizsgálata. Kutatásunk során a fémlemezen vizsgáltuk a furat készítése során rétegek között létrejövő sorját. Elsőként az előtolás (f) és a forgácsolási sebesség (v_c) hatását vizsgáltuk a tengely irányú forgácsolási erőkomponensre (F_z). Itt az előtolásnak volt szignifikáns hatása 95%-os szignifikancia intervallum mellett. Ezt követően az előtolás, a forgácsolási sebesség és a tengely irányú forgácsolási erőkomponens hatását vizsgáltuk a maximális sorjamagasságra (h) és a sorjavastagságra (b). Itt az ANOVA vizsgálat eredményeként az adódott, hogy a vizsgált faktorok hatása nem szignifikáns ($\alpha=0,05$ szignifikancia szint mellett) a vizsgált hibajelenségekre. Így az eredmények alapján a folyamatparamétereknek kisebb hatása van a fémlemezen rétegek között létrejövő sorját jellemző paraméterekre.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

Ez a kutatás az Európai Unió által támogatott EPIC 739592 azonosítójú H2020 projekt támogatásnak köszönhetően valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] L. Kala Koyyagura, P. Rao Karanam, *Influence of cutting conditions in drilling of CFRP/Al stacked composites*, 2021.
- [2] J. Liang, Y. He, *Study on the evolution and suppression strategy of the interlayer gap in the drilling of CFRP/Al stacked materials*, J Manuf Process, 2023, 92, 329–337.
- [3] A. Abdelhafeez Hassan, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, D. Arnold, A. Dowson, *An analytical model to predict interlayer burr size following drilling of CFRP-metallic stack assemblies*, CIRP Annals, 2020, 69, 109–112.
- [4] J. Xu, M. El Mansori, *Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks*, Compos Struct, 2016, 157, 461–482.
- [5] Z. Jia, C. Chen, F. Wang, C. Zhang, Q. Wang, *Analytical model for delamination of CFRP during drilling of CFRP/metal stacks*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106, 5099–5109.
- [6] Dornfeld D., Min S., *A Review of Burr Formation in Machining*, Burrs - Analysis, Control and Removal, Springer, 2010, 3–11.
- [7] K. Sridhar, G. Bolar, N.H. Padmaraj, *Comprehensive experimental investigation on drilling multi-material carbon fiber reinforced aluminium laminates*, 2022, 34, 391–401.