

Kombinált furatforgácsoló technológia fejlesztése a forgácsolásindukált rétegközi sorja minimalizálására CFRP/Al szerkezetekben

Development of a combined hole-making technology to minimize cutting-induced interlayer burr in CFRP/Al 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/fibre-reinforced polymer composite sandwich structures are increasingly utilised in various applications, with drilling being a commonly used cutting technology. During drilling of such sandwich structures, burr formation frequently occurs at both the entry and exit sides, as well as in the interlayer region (between the two plates). Due to the difficulties associated with burr removal, minimising interlayer burr formation is essential. The aim of this research is to develop a technology that reduces interlayer burr formation under the same machining parameters. To achieve this, a helical milling with spiral hole expansion was developed to reduce the risk of interlayer burr formation. The drilling experiments were designed using the Central Composite Inscribed (CCI) method, where two quantitative factors (cutting speed and feed per tooth) were varied at five levels each. In contrast, one qualitative factor (machining technology) was tested at three levels. The holes were drilled in UD-CFRP/Al (unidirectional carbon fibre-reinforced polymer composite/aluminium) sandwich plates. Interlayer burr height was measured on both sheets using a Keyence VR-5000 profilometer. In the UD-CFRP layer, the developed technology resulted in a significantly lower maximum burr height within a 95% confidence interval. Based on these findings, further investigation of the technology is necessary to explore its potential for industrial applications.

Keywords: Sandwich structure, burr; technology

Kivonat

Napjainkban egyre több helyen használják a fém/szálerősített polimer kompozit szerkezeteket, amelyeken a fúrás a leggyakrabban alkalmazott forgácsolási technológia. Az ilyen összetett szerkezetek fúrása során gyakran keletkezik sorja a be- és kilépő oldalakon, valamint rétegekben (két lemez között) egyaránt. Az eltávolítási nehézségek következtében nélkülözhetetlen a rétegközi sorja minimalizálása. A kutatás célja egy olyan technológia fejlesztése, amivel csökkenthető a rétegekben keletkező sorja ugyanazon technológiai paraméterek mellett. A kutatás során helikális marási technológiát rétegközi spirálbővítéssel adaptáltuk a rétegközi sorja kialakulási kockázatának csökkentése érdekében. A fúrási kísérletek tervezését a Central Composite Inscribed kísérlettervezési módszerrel végeztük, ahol két mennyiségi faktort (forgácsolási sebesség és fogankénti előtolás) variáltunk öt-öt szinten, míg egy minőségi faktort (technológia) variáltunk három szinten. A furatokat UD-CFRP/Al (Egyirányú szénszállal erősített polimer kompozit/Alumínium) lemezeken készítettük. A rétegközi sorja mérését egy Keyence VR-5000 típusú profilométerrel végeztük mindkét lemezen. Az UD-CFRP lemeznél az általunk fejlesztett technológia hatására szignifikánsan kisebbnek adódott 95 %-os szignifikancia intervallum mellett a maximális sorjamagasság. Az eredmények alapján szükséges a technológia további vizsgálata, a valós ipari alkalmazások felkutatásának érdekében.

Kulcsszavak: Szendvicsszerkezet, sorja, technológia

1. BEVEZETÉS

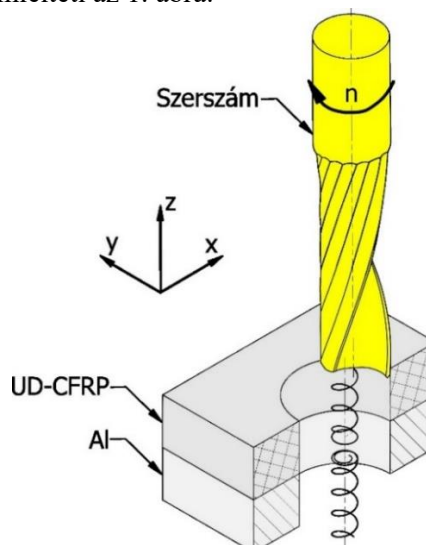
Az alumínium és szénszálerősített polimer (Al/CFRP) kompozit szendvicsszerkezetek egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek (például a repülőgépiparban) a kiváló fajlagos mechanikai tulajdonságuk miatt [1]. Gyakran alkalmazott kötési technológia ezen szerkezeteknél a csavarozás és szegecseles [2], amely kötési technológiák esetén szükség van furat készítésére. Azonban több hibajelenség is felmerül furatforgácsolás során, amelyek közül a delamináció és sorja a leggyakoribb [3]. Furatkészítés során forgácsolásindukált sorja be-, kilépő oldalon és rétegek között (két lemez között) egyaránt képződik. Ezek közül a rétegek közötti sorja eltávolítása komoly nehézségekbe ütközik, ezért célszerű a rétegek közötti sorjaképződés redukálására törekedni [4].

Sorjaképződés csökkentését több irányból is meg lehet közelíteni: a folyamatparaméterek, a szerszámgeometria és a technológia optimalizálása [5], [6]. A szakirodalomban több technológia is megtalálható, amelyek közül a leggyakrabban a hagyományos fúrást alkalmazzák annak kinematikai egyszerűsége és termelékenysége miatt, azonban ezen technológia esetén jelentős forgácsolásindukált hibaképződéssel kell kalkulálni [7]. Alagan és mtsai. [6] vizsgálták az ultrahangos fúrás hatását Al/CFRP szerkezetek száraz megmunkálási és kriogén hűtési környezet mellett is. A kiértékelés során többek között vizsgálták a létrejövő axiális forgácsoló erőkomponenst, az átmérőhibát, az alakhibát és a delaminációt. Az ultrahangos fúrás és a kriogén hűtés hatása a különböző kísérleti pontokban igen eltérő eredményt adott, így nem lehet azok egyértelmű előnyeiről beszélni a szárazmegmunkálással végzett hagyományos fúráshoz képest.

Al/CFRP szerkezeteknél a helikális marási technológia is gyakran fellelhető [2]. Pereira és mtsai [8] szakirodalmi összegzőjükben a helikális marási technológiával foglalkoznak, ahol többek között kitérnek a technológia kinematikai viszonyaira és az annak hatására kialakuló forgácsoló erőkre és hőmérsékletre. Egyértelműen látható az összegzésből, hogyha csökkentjük az axiális előtolást akkor csökken a forgácsolási hőmérséklet és az axiális forgácsoló erőkomponens. Helikális marás esetén ezt a csavarvonal menetemelkedésének csökkentésével tehető meg, a folyamatparaméterek megváltoztatása nélkül.

2. KIFEJLESZTETT TECHNOLÓGIA BEMUTATÁSA

Technológia fejlesztésekor a rétegek közötti sorja csökkentése volt a cél, főképpen a felső lemez (UD-CFRP) esetén. A kiinduló hipotézis szerint, ha csökkentjük a rétegek közötti készremunkálása során az axiális előtolást akkor redukálható a rétegek közötti sorjaképződés. A kifejlesztett technológia a helikális marás spirális furatbővítéssel (HS). A HS technológiánál elsőként előfúrást kell végezni, ami után egy csavarvonalat követve, helikális pályát követ a szerszám. A rétegek között egy megközelítési távolsággal körmarást végez a szerszám az egyenletes ráhagyás biztosításának érdekében. Ezt követően a szerszám homloklapfelülete egy megközelítési távolsággal a rétegek között végzi a spirális (arkhimédészi spirál) mozgást, amit egy körmarással simít be. Így az axiális előtolás értéke a rétegek közötti készremunkálásakor zérusnak adódik. Végezetül az alsó lemez fennmaradó részét egy helikális pálya mentén munkálja meg a maró szerszám. Az előbb ismertetett HS technológiát szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra. Helikális marás spirális furatbővítéssel

3. KÍSÉRLETI ÉS MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A kísérleteket UD-CFRP/Al lemezeken végeztük. Az UD-CFRP lemezek $\varnothing 7 \mu\text{m}$ -es névleges átmérőjű szénzással erősített vinilészter mátrixú kompozitok volt. Az alumínium lemezek anyaga AlMGSi1 volt. A lemezeket a fúrókészülékbe csavarkötéssel rögzítettük egymáshoz.

A furatokat Kondia B-640 típusú háromtengelyes maróközponton végeztük szárazmegmunkálási körülmények között. A forgács elszívását egy Nilfisk GB733 típusú ipari porszívóval végeztük. Az alkalmazott szerszámok a következők voltak:

- (i.) $D = \varnothing 10 \text{ mm}$ TIVOLY 82402211000 keményfém kétcsúcsszögű csigafúró
- (ii.) $D = \varnothing 8 \text{ mm}$ TIVOLY 82402210800 keményfém kétcsúcsszögű csigafúró
- (iii.) $D = \varnothing 6 \text{ mm}$ THOMAS 23N12065 bevonat nélküli egyélű keményfém maró

Az UD-CFRP és az Al lemezen is mértük a rétegek közötti sorját a kísérleteket követően. A méréseket Keyence VR-5000 típusú profilméteren végeztük 38x névleges nagyítás mellett. Az alkalmazott profilométer mérési pontossága $\pm 2,5 \mu\text{m}$, míg ismétlési pontossága $\pm 0,4 \mu\text{m}$. A mérési eredményeket a mérőgép szoftveréből $7,838 \mu\text{m}$ felbontással exportáltuk ki. A maximális sorjamagassági értékeket minden furat esetén $\varphi = 1^\circ$ -os lépésközzel mértük meg. Az előzőekben jellemzett kísérleti és mérési környezet az 2. ábrán látható.



(a)



(b)

2. ábra. (a) Kísérleti és (b) mérési környezet

A kísérlettervezést a Central Composite Inscribed (CCI) típusú kísérlettervezési módszerrel végeztük a Minitab szoftverben. Faktorként a forgácsolási sebességet (v_c), a fogankénti előtolást (f_z) és a technológiát (S) variáltuk. A vizsgált faktorkok és azok szintjei az 1. táblázatban láthatóak.

Az alkalmazott faktorkok és faktorszintek, ahol a C jelöli a hagyományos fúrást, H a helikális marást és HS jelöli a helikális marást rétegek közötti spirálbővítéssel

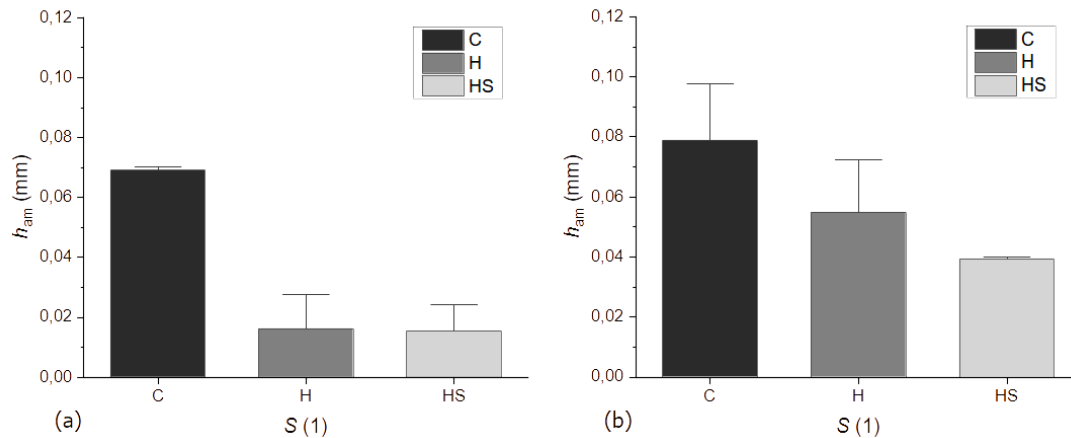
1. táblázat

Faktorkok		Faktorszintek				
		1	2	3	4	5
Forgácsolási sebesség	$v_c \text{ (m/min)}$	100	114,65	150	185,36	200
Fogankénti előtolás	$f_z \text{ (mm)}$	0,025	0,033	0,05	0,068	0,075
Technológia	$S \text{ (1)}$	C	H	HS		

A C technológiánál a $D = \varnothing 10 \text{ mm}$ -es csigafúrót alkalmaztuk, míg a H és a HS technológia esetén az előfúrást a $D = \varnothing 8 \text{ mm}$ -es csigafúróval végeztük, a készremunkálást pedig a $D = \varnothing 6 \text{ mm}$ -es marószerszámmal végeztük.

4. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

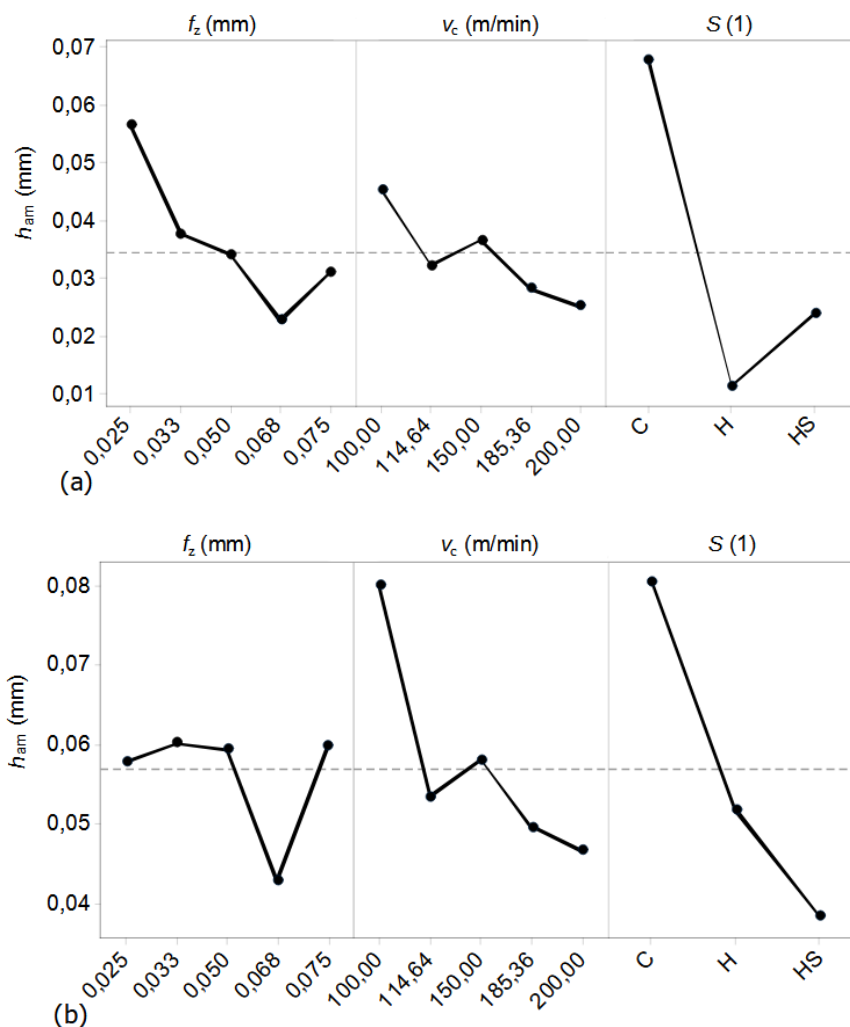
Az eredmények kiértékelése során elsőként a kísérleti középpontban vizsgáltuk a rétegek közötti átlag maximális sorjamagasságot (h_{am}), amely eredményeket a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. Átlag rétegeközi maximális sorjamagasság értékek: (a) alumínium lemezen és (b) UD-CFRP lemezen

A 3. ábra alapján látható, hogy alumínium lemez esetén (3.a ábra) a C technológia eredményezte a legnagyobb átlag maximális sorjamagasságot, míg a H és a HS technológiák megközelítőleg megegyező eredményt adtak. Az UD-CFRP lemez esetén (3.b ábra) szintén a C technológia adta a legnagyobb átlag maximális sorjamagasságot, míg a HS technológia 28%-kal kisebb sorját eredményezett, mint a H technológia. Ezen felül az eredmények szórása is kisebbnek adódott a HS technológia esetén, mint a C és a H technológiáknál.

Az egész kísérleti tartományban vett eredményeket a 4. ábrán lévő főhatás diagrammok szemléltetik.



4. ábra. Átlag rétegeközi maximális sorjamagasság főhatás diagrammok: (a) alumínium lemezen és (b) UD-CFRP lemezen

Mindkét lemez esetén látható (4. ábra), hogy a technológiának (S) van a legnagyobb hatása a h_{am} mérőszámra. Az alumínium lemez esetén (4.a ábra) a H technológia, az UD-CFRP lemez esetén pedig a (4.b ábra) HS technológia eredményezte a kisebb rétegek közötti átlag maximális sorjamagasságot. A folyamatparamétereket tekintve a fogankénti előtolás (f_z) esetén nehéz egyértelmű következtetéseket levonni, ami abból származik, hogy ezen paraméternek csak a C és H technológia esetén van hatása az axiális előtolás értékére, míg HS technológia esetén minden esetben zérus az axiális előtolás. A forgácsolási sebességet (v_c) tekintve a főhatás diagrammok (4. ábra) alapján a nagyobb értékek eredményeznek kisebb rétegek közötti sorját.

A kapott eredmények megegyeznek az előzetes várakozásokkal, ami szerint, ha az axiális előtolás értékét csökkentjük, akkor redukálható a rétegek közötti sorjaképződés a felső lemez (UD-CFRP) esetén. Aminek háttérében az áll, hogy az UD-CFRP lemez rétegek közöttben kilépőoldalon van, ahol jelentős hatása van az axiális forgácsoló erőkomponensnek. Az eredmények noha nagyon biztatóak, további fejlesztéseket tervezünk végezni a HS technológián, ami például a technológia kinematikai viszonyainak az optimalizálása több szempontból. Ilyen szempontok lehetnek a létrehozható minőség és az anyageltávolítási ráta. Ezzel vizsgálható a technológia alkalmazhatósága ipari szempontból.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunkban egy új furatforgácsoló technológiát (HS) fejlesztettünk, aminek célja a rétegek közötti sorjaképződés redukálása volt az ott tapasztalható bonyolult sorjaképződési mechanizmusok miatt. A kifejlesztett HS technológiával a rétegek közötti készremunkálása során a maró szerszám egy spirális pálya mentén távolítja el a maradék anyagot, így az axiális forgácsoló erőkomponens zérusnak adódik. A kísérleti eredmények alapján az alkalmazott lemezsorrend (UD-CFRP/Al) mellett az UD-CFRP lemez esetén csökkenthető a rétegek közötti átlag maximális sorjamagasság a kifejlesztett technológiával a hagyományos fúráshoz és a helikális maráshoz képest. Ezek alapján a helikális marás spirális furatbővítéssel egy megfelelő alternatívát nyújthat az Al/CFRP lemezek furatmegmunkálásakor fellépő jelentős rétegek közötti sorjaképződésre.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott EKÖP-24-4-II-BME-157 kódú támogatásnak köszönhetően valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] N. Eswara and P. R. J. H. Wanhill, "Indian Institute of Metals Series Aerospace Materials and Material Technologies," 2017.
- [2] E. Doluk, "Comparison of hole quality after drilling and helical milling of the Al/CFRP stacks," *Technologia i Automatyizacja Montażu*, vol. 122, no. 4, pp. 3–12, 2023, doi: 10.7862/tiam.2023.4.1.
- [3] X. Zhang, M. Li, and D. Huang, "Surface quality and burr characterization during drilling CFRP/Al stacks with acoustic emission monitoring," *J Manuf Process*, vol. 98, pp. 138–148, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.04.076.
- [4] G. Franz, P. Vantomme, and M. H. Hassan, "A Review on Drilling of Multilayer Fiber-Reinforced Polymer Composites and Aluminum Stacks: Optimization of Strategies for Improving the Drilling Performance of Aerospace Assemblies," Sep. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/fib10090078.
- [5] J. M. Jebaratnam and M. H. Hassan, "Process enhancement and performance evaluation of single-shot drilling of CFRP/aluminum stacks: a review," Dec. 01, 2024, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s00170-024-14610-8.
- [6] N. Tamil Alagan et al., "Investigation of the quality of Al-CFRP stacks when drilled using innovative approaches," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 43, pp. 260–272, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cirpj.2023.04.011.
- [7] R. D. F. S. Costa, J. N. S. Duro, V. F. C. Sousa, T. E. F. Silva, D. A. Figueiredo, and A. M. P. Jesus, "Drilling of CFRP/Al multi-material stacks using WC-Co CVD diamond coated tools," in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2024, pp. 376–385. doi: 10.1016/j.prostr.2024.01.044.
- [8] R. B. D. Pereira, L. C. Brandão, A. P. de Paiva, J. R. Ferreira, and J. P. Davim, "A review of helical milling process," Sep. 01, 2017, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.05.002.