

Forgácsolásindukált sorja kísérleti vizsgálata mikrofúrt CFRP kompozitban

Experimental analysis of machining-induced burrs in micro-drilled CFRP composite

SEPRŐS Szilárd¹, Dr. GEIER Norbert¹

¹ 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

The challenges of machining anisotropic composites and those of micro drilling occur together during the micro drilling of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites. The main aim of this research is to analyze micro-drilled holes in CFRP composite. The experiments were carried out at 3 feed levels, machining 1000 holes per feed levels. Hole images were taken with a Keyence VR-5200 profilometer and processed with digital image processing. The significance of the feed was examined using analysis of variance (ANOVA). Based on the ANOVA results, the effect of feed on hole quality is significant.

Keywords: CFRP; Micro drilling; Machining; Burr; Digital image processing

Kivonat

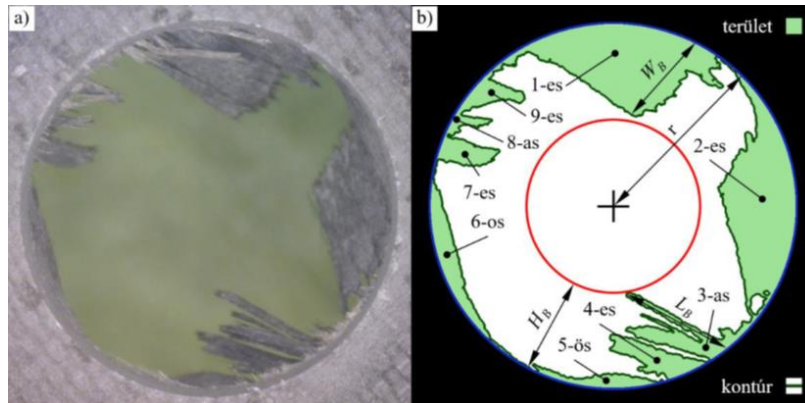
A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok mikrofúrása során együtt jelentkeznek az anizotróp kompozitok forgácsolásának és a mikrofúrásnak a kihívásai. A kutatás fő célja a CFRP kompozitba mikrofúrt furatok megfigyelése és jellemzése. A kísérletek 3 különböző előtolási szinten lettek elvégezve, előtolásonként mintegy 1000 furatot készítve. A furatképek egy Keyence VR-5200-as profilométer felhasználásával készültek és digitális képfeldolgozással lettek kielemezve. Varianciaanalízis vizsgálat alapján a furatok minőségére szignifikáns hatása van az előtolásnak.

Kulcsszavak: CFRP; Mikrofúrás; Forgácsolás; Sorja; Digitális képfeldolgozás

1. BEVEZETÉS

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozit anyagok forgácsolása gyakran elengedhetetlen a kellő alak- és méretpontosság elérése és a szerelhetőségi feltételek miatt, ez a művelet ugyanakkor számos kihívást tartalmaz, melyek megoldásával számos aktuális kutatás foglalkozik [1,2]. Szálerősített polimer kompozitok fúrása esetén az anyag anizotrop és inhomogén szerkezete jelentős befolyással van a megmunkált furat tulajdonságaira, a két legjelentősebb makrogeometriai hiba a vágatlan szálak megmaradása, valamint a rétegek közötti szétválás, másnéven a delamináció [3,4]. A forgácsolási sebesség (v_c) és a szálak iránya (k) között bezárt szög a szálvágási szög (θ), aminek a nagysága jelentősen befolyásolja a forgácsképződés mechanizmusát. Bizonyos szálvágási szögtartományban olyanok a forgácsképződési mechanizmus tulajdonságai, hogy nagy valószínűséggel maradnak vissza kisebb-nagyobb vágatlan szálak [5]. Ilyen vágatlan szálak és szálkötegek láthatóak az 1. ábrán. A megmaradó vágatlan szálak és a delamináció jelentős alak- és szerelési hibákat okozhatnak a munkadarabon. Mikrofúrás esetén a mérethatás miatti probléma is megjelenik, amely esetben fajlagosan nagyobb forgácsolóerő és szerszámterhelés jelentkezik [2]. Ezen okok miatt a szerszámkopás és a szerszám kihajlása is nagyobb mértékű lesz, ezzel rontva az elkészített mikrofuratok minőségét [6]. A téma kihívásainak ismeretében ezen kutatás fő célja a vizsgált forgácsolási paraméter szintjei közül a szignifikánsan kedvezőbb meghatározása, valamint a furatszám függvényében a sorjaképződés mértékének feltárása volt. A forgácsolási paraméterek közül az előtolás van az egyik legnagyobb hatással mind az elkészített furatok jóságának, mind a szerszámterhelés szempontjából, így a kísérletek során az előtolás három szinten való változtatásával figyeltük meg a furatok minőségének alakulását nagy furatszám

(előtolásonként 1000 furat) mellett. A sorjaképződést a furatokról digitális mikroszkóppal készített képek alapján elemeztük ki, ezek a furatképek pedig egy saját algoritmus alkalmazásával lettek feldolgozva és mérőszámmal jellemezve. A furatok mérőszámmal jellemzése pedig elérhetővé tette azok összehasonlítását, valamint a sorjaképződés és az előtolási szintek közötti kapcsolat szignifikanciájának vizsgálatát.



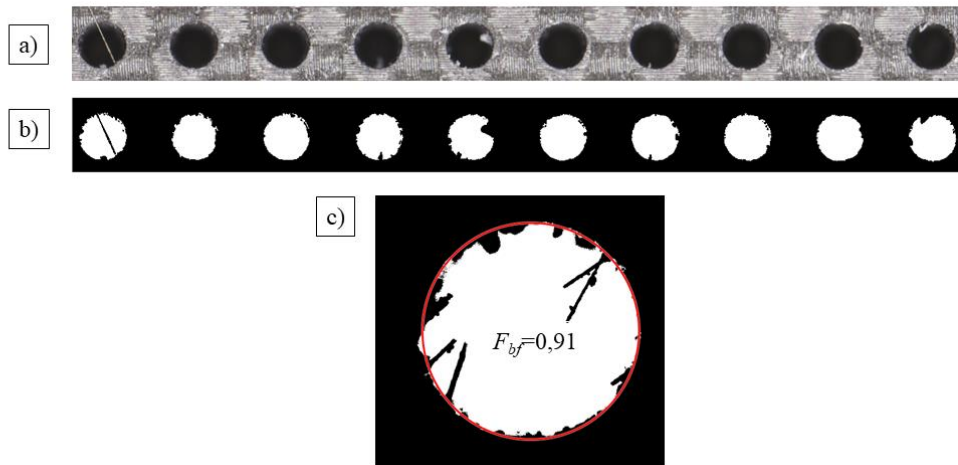
1. ábra. CFRP kompozit fúrása során megmaradt vágatlan szálak [3]

2. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK ÉS MÓDSZEREK

A fúrési kísérletek egy vinil mátrixú, szélső rétegeiben biaxiális elrendezésű UD-CFRP kompozit munkadarabokon lettek elvégezve egy SECO gyártmányú $d=0,5$ mm átmérőjű bevonat nélküli keményfém mikrofúró szerszámmal. A kísérlet egy NCT VHTC-130 LINEAR öttengelyes CNC marógépen lett elvégezve. A fúrési műveletek $v_c=50$ m/min forgácsoló sebességgel történtek $a=2$ mm névleges furatmélység alkalmazásával. A munkadarabon a furatközéppontok 1-1 mm távolságra voltak egymástól az x és y tengely irányában. A száraz megmunkálás miatt a forgácsolás során gondoskodni kellett a keletkező porszerű forgács elszívásáról. A kísérlet során egy Mitutoyo típusú HER320 jelű mérőóra használatával a szerszámütés mérése és beállítása is megtörtént, a szerszámütés kvázi azonos mértékű volt ($< 0,05$ mm) a furatok elkészítése során. A furatokon kialakuló sorját 3 különböző előtolási értéken vizsgáltam ($f_1= 8 \mu\text{m}$, $f_2= 16 \mu\text{m}$, $f_3= 24 \mu\text{m}$). Mindegyik előtolási szinthez egy ugyanolyan típusú és kvázi azonos, új állapotú mikrofúrót használtunk fel. Mindhárom előtolási szint esetén 1000 furat lett elkészítve és feldolgozva. A furatokról a képek egy Keyence gyártmányú VR-5200 típusú profilométerrel lettek elkészítve, egy ilyen képrészlet látható a 2. ábrán. Az elkészített képeket digitális képfeldolgozással dolgoztuk fel Matlab környezetben az Image Processing Toolbox eszköztár segítségével. Az elkészített képfeldolgozó programkód felépítése az alábbi volt:

1. Képek importálása
2. Kép binarizálása
3. Binarizált kép hibáink tisztítása
4. Körillesztés a furatra
5. Furatsorrend detektálása
6. Adatok exportálása

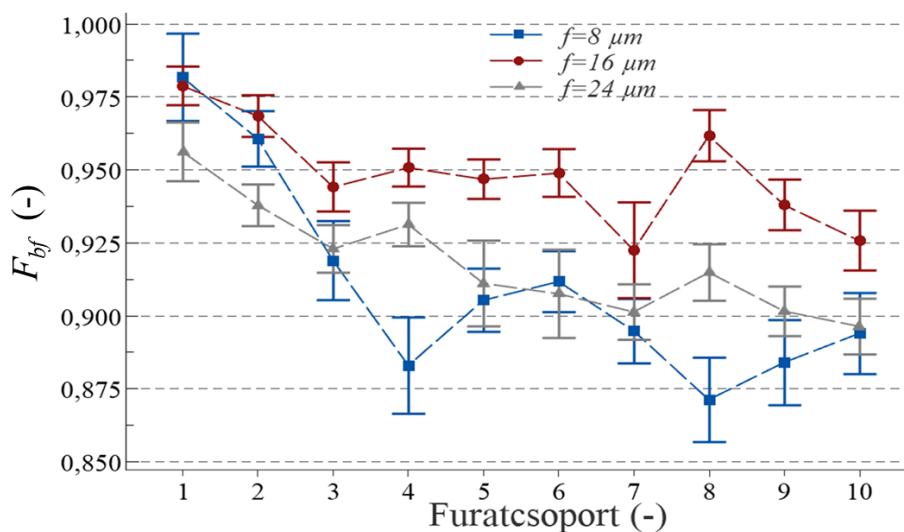
A megírt programmal a sorjamentes terület (F_{bf}) értékét tudtuk meghatározni a binarizált képek alapján, a 2. ábra ábrázol egy binarizált képet, valamint szemléltet egy furatot a hozzá tartozó sorjamentes területfaktor értékkel is. A névleges furatátmérő és a sorjamentes terület ismeretében kiszámítható a sorjaterület valamint a sorjamentes területfaktor értéke. A kiértékelésnél az utóbbi, dimenzió nélküli mérőszámot használtam, mely prezentálja a sorjamentes és a névleges terület arányát. A furatok minőségét – és így a sorja mértékét – a sorjamentes területfaktorral jellemezve elemeztük ki a 3 különböző előtolási szinten, valamint az elkészített furatok számában. Mivel előtolási szintenként 1000 mikrofurat lett elkészítve, így a kiértékelés során furatcsoportok lettek létrehozva az adatok egyszerűbb kezelhetősége okán. Egy furatcsoportot 100 furat alkot, így egyszerűbb volt a kiértékelés, valamint az adatok grafikonon való szemléltetése is átláthatóbbá vált. A furatcsoportokhoz tartozó sorjamentes területfaktor átlag és szórás értékeinek ismeretében varianciaanalízis (ANOVA) vizsgálatot hajtottunk végre a Minitab statisztikai szoftverben. Az előtolás, valamint a furatok számának hatása a forgácsolás indukált sorjára ANOVA vizsgálattal lett megállapítva.



2. ábra. a) a furatokról készített kép b) a binarizált kép c) egy feldolgozott furatkép feltüntetve a névleges furat méretével és a sorjamentes területfaktor értékével

3. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE ÉS ÉRTELMEZÉSE

A sorjamentes területfaktor (F_{bf}) átlagos és szórási értékeit furatcsoportonként (1 furatcsoportot 100 furat alkot) a 3. ábra mutatja mindhárom előtolási szint esetén. Az ábrán látható a sorjamentes területfaktor értékének csökkenése az elkészített furatok növelésével. Az ábra alapján a középső előtolási értéknél ($f=16 \mu\text{m}$) a területfaktor értékek jellemzően magasabbak, mint a két másik előtolási érték esetén.



3. ábra. A sorjamentes területfaktor értékeinek változása előtolásonként és furatcsoportonként

Az ANOVA vizsgálat eredményei alapján a különböző előtolási értékek szignifikáns hatással vannak a kialakuló sorjára, ezáltal a furatok minőségére. Az előtolási értékek közül az $f=16 \mu\text{m}$ értékű előtolás szignifikánsan jobb furatminőséget – kevesebb forgácsoldódást – eredményez. Ezt a jelenséget okozhatja a CFRP kompozitok erősítőanyagának, a szénszálnak a szálvastagsága ($7-8 \mu\text{m}$) és a kétélű mikrofúró szerszám élenkénti előtolásának a kapcsolata. A középső előtolási szint esetén az élenkénti előtolás és a szálvastagság hasonló méretű, ez pedig kedvező hatással lehet a rétegek közötti könnyebb szétválásra, ennek a felvetésnek a bizonyítása ugyanakkor további fúrési kísérleteket követel meg. Továbbá az $f=16 \mu\text{m}$ értékű előtolási szint esetén tapasztaltuk általánosan a legkisebb sorjamentes területfaktor szórási értékeket a furatcsoportokon belül.

Az elkészített furatok számának hatása a sorjaképződésre

1.táblázat

$f(\mu\text{m})$	Adj SS	Adj MS	F-érték	P-érték
8	0,5482	0,2741	43,30	0,000
16	0,1407	0,0704	40,41	0,000
24	0,1979	0,0990	25,79	0,000

A sorjamentes területfaktor értékeinek változását az elkészített furatok függvényében ANOVA vizsgálattal elemeztem ki. Ennek eredményeit mutatja az 1. táblázat, mely alapján mindegyik előtolási szint esetén a furatcsoportok sorjamentes területfaktor értékei között szignifikáns eltérés van (P-érték <0,05 minden esetben), így az elkészített furatok száma szignifikáns hatással van a furatok minőségére. Ez a folyamat a mikrofúró szerszámok folyamatos kopásának tudható be. A szerszámok kopása a fúrási ciklusok során nyomon lett követve (terjedelmi korlátok miatt nem kerül bemutatásra) és mindhárom szerszám hasonló kopási jeleget mutatott, valamint szerszám törést vagy kritikus sérülést nem tapasztaltunk.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során szénszállal erősített polimer kompozit mikrofúrása során vizsgáltuk a forgácsolásindukált sorját, mellyel az elkészített furatok minőségét jellemeztük. Célunk a kiválasztott paraméter – az előtolás – optimalizálása volt az adott forgácsolási körülmények mellett. Három előtolási szinten összesen 3000 furat lett elkészítve. Ezekről egy Keyence gyártmányú VR-5200 típusú profilométerrel készítettünk képeket. A furatképeket egy saját képfeldolgozó algoritmussal elemeztünk és értékeltük ki. A programból kinyert mérőszámokat grafikusán ábrázoltuk és varianciaanalízis vizsgálatot alkalmazva megállapítottuk a hatások szignifikanciáját. Mind az elkészített furatok száma, mind az előtolás hatása szignifikáns a képződő sorjára az ANOVA vizsgálat alapján. Az elkészített furatok számának szignifikáns hatását a sorjaképződésre feltételezhetően a mikrofúró szerszám folyamatos kopása okozza. Az előtolás esetén a három szint közül a középső volt optimális a forgácsolásindukált sorjaképződés tekintetében, ennek okára feltételezésünk van, melyet esetlegesen további kísérletek során lehetne bizonyítani vagy elutasítani.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás az USA és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00050 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

Ez a kutatás az Európai Unió által támogatott EPIC 739592 azonosítójú H2020 projekt támogatásnak köszönhetően 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, okt. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109155.
- [2] N. Geier és mtsai., „A critical review on mechanical micro-drilling of glass and carbon fibre reinforced polymer (GFRP and CFRP) composites”, *Composites Part B: Engineering*, o. 110589, 2023.
- [3] Poór D. I., Geier N., Pereszlai C., és Balázs B. Z., „Sorjavizsgálati mérőszámok összehasonlító elemzése szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitokban”, *Gradus*, köt. 8, sz. 1, o. 272–277, 2021, doi: 10.47833/2021.1.ENG.008.
- [4] D. Geng és mtsai., „Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review”, *Composite Structures*, köt. 216, o. 168–186, máj. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.02.099.
- [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, o. 3139–3154, febr. 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2895-8.
- [6] H. Watanabe, H. Tsuzaka, és M. Masuda, „Microdrilling for printed circuit boards (PCBs)—Influence of radial run-out of microdrills on hole quality”, *Precision Engineering*, köt. 32, sz. 4, o. 329–335, okt. 2008, doi: 10.1016/j.precisioneng.2008.02.004.