



Töltőanyagok hatásvizsgálata szénszálerősítésű polimer kompozitok forgácsolhatóságára

Analysis of the effect of fillers on the machinability of carbon fibre reinforced polymer composites

¹Magyar Gergely, ²Poór Dániel István, ³Lukács Tamás, ⁴Geier Norbert

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Gépészmérnöki Kar – Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, magyar.gergely@edu.bme.hu

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Gépészmérnöki Kar – Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, poor.daniel@gpk.bme.hu

³Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Gépészmérnöki Kar – Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, lukacs.tamas@edu.bme.hu

⁴Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Gépészmérnöki Kar – Gyártástudomány és -technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, geier.norbert@gpk.bme.hu

Összefoglalás

A szénszálerősítésű polimer (CFRP) kompozit anyagokat egyre gyakrabban alkalmazzák olyan szerkezeti alkatrészek elemeként, ahol a kis tömeg mellett kiváló mechanikai tulajdonságokat szükséges biztosítani. Ezen anyagoknak a forgácsolása sok esetben szükséges, melyre leginkább jellemző technológia a fúrás. Kutatásunk során három, különböző mennyiségben töltőanyagot tartalmazó CFRP kompoziton végeztünk fúrési kísérleteket. A fúrési kísérletek során fellépő forgácsolási erőt vizsgáltuk varianciaanalízis (ANOVA) segítségével. Vizsgálataink során megállapítottuk, hogy a töltőanyagok mennyisége szignifikáns hatással van a CFRP kompozit anyagok fúrása során jelentkező forgácsolási erőre.

Kulcs szavak: CFRP, töltőanyag, fúrás, forgácsolási erő

Abstract

The use of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composite materials is becoming increasingly popular in applications where high mechanical properties are required at low weight. Machining of these materials is often necessary, and the most common technology is drilling. Our research involved drilling experiments on three CFRP composites containing different amounts of fillers. The machining forces during the drilling experiments were investigated by analysis of variance (ANOVA). Our investigations revealed that fillers have a significant effect on the cutting force when drilling CFRP composites.

Keywords: CFRP, filler, drilling, cutting force

1. Bevezetés

Napjainkban a szénszálerősítésű polimer (CFRP) kompozitok alkalmazása egyre nagyobb népszerűségnek örvendek olyan csúcscategóriás iparágak területén, mint például a repülőgépipar, energiaipar, sporteszközgyártás vagy a gépjárműgyártás [1-2]. Ezen iparágak esetén jellemző, hogy az alkatrészeknek kis tömeg mellett kiváló szilárdsági tulajdonságokkal szükséges rendelkezniük,

mely tulajdonságok elérhetők CFRP kompozit alkalmazásával [3]. A CFRP kompozit alkatrészek gyártása során általában a tervezett geometriai sajátosságok előállítását megtörténik, azonban az alkatrészek szereléséhez szükséges csatlakozó felületek előállítását utólagos megmunkálással, azon belül is gyakran mechanikai úton történő forgácsolással valósul meg [4]. Az egyik leggyakoribb utólagos megmunkálási technológia a CFRP kompozitok fúrása, mellyel kiváló minőségű furatok előállítását valósítható meg, azonban az anyag inhomogén és anizotrop szerkezete miatt eltérő kihívások jelentkeznek ezen gyártási folyamat során a hagyományosan forgácsolt, kvázi homogén szerkezetű anyagokhoz (pl. acél, alumínium) képest [5-6]. Az elsősorú kihívások a fúrásindukált geometriai hibák kialakulása (sorja és a delamináció stb.), valamint az erősítő szálak koptató hatása következtében jelentkező nagymértékű szerszámkopás [7].

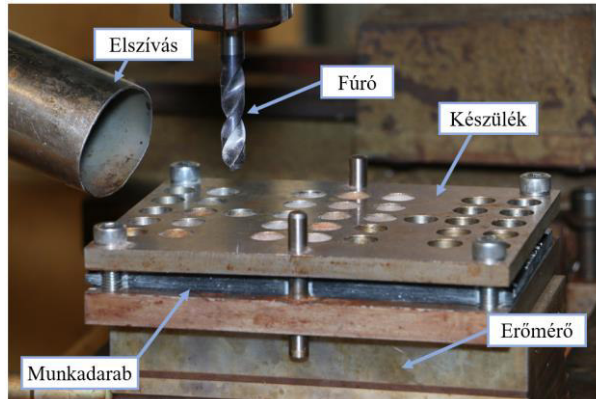
CFRP kompozit anyagokban egyre gyakrabban alkalmaznak töltőanyagokat a szilárdsági tulajdonságok javítása, illetve a gyártási költségek csökkentése érdekében, azonban a töltőanyagot tartalmazó CFRP kompozitok fúrásának témakörével jelentősen kevesebb tanulmány foglalkozik a töltőanyagot nem tartalmazó CFRP kompozitokhoz képest [8]. A mérsékelt mennyiségű fellelhető publikáció, azonban azt mutatja, hogy a töltőanyagok előnyös hatással lehetnek a CFRP anyagok forgácsolhatóságára a keletkező fúrás-indukált geometriai hibák keletkezése [9] és a fellépő forgácsolási erő tekintetében [10]. Elsődleges célunk a töltőanyagok mennyiségének hatásvizsgálata volt a CFRP kompozitok forgácsolása esetében, tekintettel a jelenleg fellelhető kis mennyiségű kutatásokra, illetve a töltőanyagok várható előnyös tulajdonságaira. A hatásvizsgálat a forgácsolási erő elemzésével történt.

2. Kísérleti anyagok és környezet

A fúrás kísérletek három különböző CFRP kompozit anyagon lettek elvégezve, melyek esetében azonos, IPOX MH3010-es epoxi gyanta mátrixanyag került felhasználásra IPOX MH3124-es térhálósítóval 100:30-as keverési arány alkalmazása mellett. A három CFRP kompozit erősítőstruktúrája eltérő volt. Az első erősítőstruktúra csak örölt szénszálakat tartalmazott töltőanyagként, melyek 45 ± 28 μm hosszúságúak voltak (T), a második erősítőstruktúra szénszál paplant tartalmazott töltőanyag nélkül (P), míg a harmadik struktúra az első kettő kombinációját alkalmazó hibrid erősítés volt (H).

A fúrás kísérletek egy Kondia B640 háromtengelyes megmunkálóközponton kerültek elvégzésre, a szálerősített kompozitok megmunkálására jellemző száraz körülmények között, mely során egy Nilfisk GB733 típusú ipari porszívóval történt a megfelelő elszívás biztosítása. A vizsgálatok során a forgácsolási erő mérését egy KISTLER 9257BA típusú erőmérő segítségével végeztük el, melyhez szükség volt továbbá egy KISTLER 5070-es többcsatornás töltésérősítőre, valamint egy National Instruments USB-4431-es adatgyűjtő kártya. A fúrás kísérletekhez alkalmazott szerszám egy Tivoly Polaris 150 Sim Dim 6537K $\varnothing 10$ mm-es átmérőjű, szálerősített kompozitok megmunkálásához ajánlott tömör keményfém fúró volt, mely TiNAl bevonattal volt ellátva. A kísérletek során használt eszközök az *1. ábrán* megfigyelhetők.

Annak érdekében, hogy viszonylag kevés forgácsolási kísérlet elvégzése mellett, megfelelő pontosságú képet kapjunk a különböző mennyiségben töltőanyagot tartalmazó CFRP kompozitok forgácsolhatóságáról, Central Composite kísérletterv lapközepes altípusát alkalmaztuk, mely során három faktor szintjeit határoztuk meg, mely közül az előtolás (f) és a forgácsolási sebesség (v_c) folytonos faktorok voltak, míg az erősítőstruktúra kategorikus faktor volt. Az egyes faktorokat korábbi kísérleti tapasztalatok és gyártói ajánlások szerint határoztuk meg három-három szinten, melyek a *1. táblázatban* olvashatók.

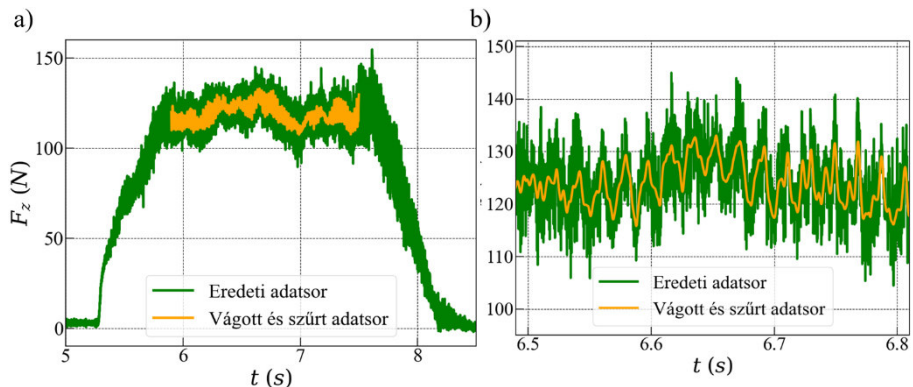


1. ábra. Kísérleti körülmények.

1. táblázat. Fúrási kísérleteket során alkalmazott faktorok és szintjeik.

Alkalmazott faktorok	Szintek		
	-1	0	1
Előtolás – f (mm/fordulat)	0,1	0,2	0,3
Forgácsolási sebesség – v_c (mm/min)	50	100	150
Erősítő struktúra	T	P	H

A fúrási kísérletek során a KISTLER erőmérőből származó adatokat egy LabView program segítségével rögzítettük 10.000 Hz-es mintavételezési frekvenciával. A kapott erő adatokat ezután egy Python nyelven írt egyedi kiértékelő szoftver segítségével dolgoztuk fel, mely során a szoftver első lépésben a hasznos adatsor kivágását végezte, ezután egy Butterworth aluláteresztő szűrővel végezte az adatok szűrését 300 Hz-es határértékérték mellett, végül meghatározta a maximálisan fellépő forgácsolási erőt (F_z) a szűrt adatsorokra, mely az adott fúrási kísérletet ezután jellemezte. A feldolgozás előtt álló és feldolgozott adatokat a 2. ábra mutatja be.



2. ábra. Fúrási kísérletek során kapott feldolgozás előtti (zöld) és feldolgozott (sárga) adatsorok (a) a teljes fúráás alatt és (b) az állandósult szakaszon.

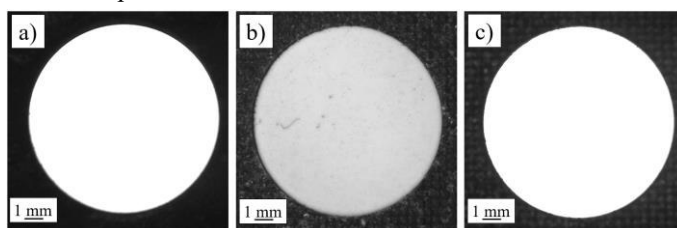
Annak érdekében, hogy meghatározzuk az egyes faktorok hatását a fellépő forgácsolási erőre,

varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaztunk. Vizsgálataink során egy faktor hatását abban az esetben ítéltük szignifikánsnak, ha legalább az $\alpha=0,05$ szignifikancia szintet elérte.

A mért erőadatok kiértékelésén felül a készített furatok minőségének meghatározása és dokumentálása érdekében a megmunkálás után fotókat készítettünk a munkadarab megmunkálás szerinti belépési és kilépési oldaláról is. Erre a célra a Mitutoyo Quick Image QI-A505 optikai mikroszkópot használtunk.

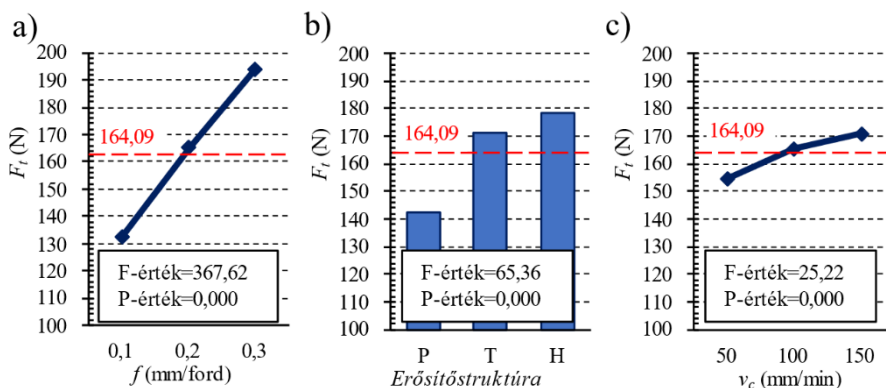
3. Eredmények

A fúrési kísérletek eredményei azt mutatták, hogy mindegyik különböző erősítőstruktúra esetén kiváló minőségű furatokat sikerült előállítani. A szálerősített kompozitok fúrására jellemző geometriai hibák gyakorlatilag elhanyagolható mennyiségben jelentkeztek. A készített furatokról nyújt egy-egy reprezentatív példát a három különböző erősítőstruktúrák esetén a 3. ábra.



3. ábra. Fúrési kísérletekkel létrehozott furatok jellemző minősége (a) T típusú, (b) P típusú és (c) H típusú erősítőstruktúra esetén.

A furatok minőségében tehát nem jelentkezett a töltőanyagok mennyiségének hatása, azonban a fellépő forgácsolási erő esetében már igen. Az ANOVA vizsgálatok eredménye azt mutatta, hogy az előtolás (F-érték = 367,62; P-érték = 0,000), a forgácsolási sebesség (F-érték = 25,22; P-érték = 0,000) és az erősítőstruktúra (F-érték = 100,00; P-érték = 0,000) is szignifikáns hatással van a fellépő forgácsolási erő axiális komponensére (F_r). A 4. ábrán látható főhatás diagramokon megfigyelhető, hogy az eddigi tapasztalatoknak és a várakozásoknak megfelelően a leginkább szignifikáns hatása az előtolásnak van, ezt követi az erősítőstruktúra, majd a forgácsolási sebesség. Az előtolás és a forgácsolási sebesség növekedésével növekszik a fellépő maximális forgácsolási erő. Az erősítőstruktúrák esetén az eddigi kutatók tapasztalataival ellentétes eredmények születtek, ugyanis a töltőanyagok alkalmazásával a CFRP kompozit anyagok nehezebben forgácsolhatók lettek. Megfigyelhető, hogy a töltőanyag és a paplan erősítőstruktúra együttes alkalmazása esetén volt a legnagyobb a fellépő forgácsolási erő (H típusú erősítőstruktúra), ezt követte a csak töltőanyagot tartalmazó (T típusú erősítőstruktúra), majd a legkisebb fellépő forgácsolási erőt produkáló paplan erősítőstruktúra (P típusú erősítőstruktúra). Korábbi kutatások során szén nanocsöveket alkalmaztak [8], melyek feltételezhetően kenő hatást biztosítottak, a jelen kísérletek során alkalmazott rövid, vágott szénszálakkal ellentétben. A forgácsolási erő növekedésének egy további oka lehet, hogy a töltőanyagot tartalmazó kompozitok esetében a szálak nem csak a forgácsolás irányára merőlegesen állhatnak, hanem azzal megegyezően is, ezzel jelentősen megnehezítve az elvágásukat. A CFRP kompozitok erősítő szénszájai kiváló hővezetési tulajdonságokkal rendelkeznek, melyek feltehetően csökkenthetik a forgácsolás során fellépő hőmérsékletet. Mivel a rövid, vágott szálak a tér minden irányában állhatnak, így elvezethetik a keletkező hőt és feltételezhetően a töltőanyagot tartalmazó erősítőstruktúrák esetén kisebb forgácsolási hőmérséklet fog fellépni, így a jövőben ezen irányban fogunk vizsgálatokat végezni.



4. ábra. Főhatás diagramok (a) előtolás, (b) erősítőstruktúra és (c) forgácsolási sebesség esetén.

4. Konklúziók

Kutatásunk során három különböző erősítőstruktúrájú CFRP kompozitot vizsgáltunk, melyek különböző mennyiségben tartalmaztak töltőanyagot. A kompozitokon fúrási kísérleteket végeztünk, hogy meghatározzuk milyen hatással vannak a készített furat minőségére, illetve a fellépő forgácsolási erőre a töltőanyag mennyisége. Az előállított furatokról készített képek alapján megállapítottuk, hogy mindegyik erősítőstruktúra esetén kiváló minőségű furatokat sikerült létrehozni a vizsgálati körülmények között. A forgácsolási erő adatokon végzett ANOVA vizsgálat során megállapítottuk, hogy mindegyik vizsgált faktor szignifikáns hatással van a forgácsolási erőre, ezek közül legnagyobb hatással az előtolás, majd az erősítőstruktúra és végül a forgácsolási sebesség rendelkezik. Várakozásainkkal ellentétben a töltőanyagok ellentétes hatást mutattak a fellépő forgácsolási erőre, ugyanis a töltőanyagok alkalmazásával egyre nagyobb forgácsolási erő lépett fel. A paplan erősítőstruktúrárt és töltőanyagot tartalmazó (H típus) esetén volt a legnagyobb fellépő erő, ezt követte a csak töltőanyagot tartalmazó típus (T típus), majd a csak paplan erősítőstruktúrárt tartalmazó típus (P típus). Mivel a szénszálak kiváló hővezetési tulajdonságokkal rendelkeznek, így jövőbeli kutatásunkban a töltőanyagok forgácsolás során fellépő hőmérsékletre való hatását vizsgáljuk CFRP kompozitok esetén.

Köszönetnyilvánítás

Ez a kutatás a Kulturális és Innovációs és Minisztérium ÚNKP22-2-III-BME-80, ÚNKP-22-3-I-BME-92 és ÚNKP-22-5-BME-327 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával és a Magyar Tudományos Akadémia által finanszírozott, BO/00508/22/6 számú Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

5. Hivatkozások

- [1] Geier, N., Davim, J. P., & Szalay, T. (2019). Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105552.
- [2] Geier, N., & Pereszlai, C. (2020). Analysis of characteristics of surface roughness of machined CFRP composites. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64(1), 67-80.
- [3] Zhu, W., Fu, H., Li, F., Ji, X., Li, Y., & Bai, F. (2022). Optimization of CFRP drilling process: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(5-6), 1403-1432.
- [4] Fernández-Pérez, J., Díaz-Álvarez, J., Miguélez, M. H., & Cantero, J. L. (2021). Combined analysis of wear mechanisms and delamination in CFRP drilling. *Composite Structures*, 255, 112774.
- [5] Geier, N., Poór, D. I., Pereszlai, C., & Tamás-Bényei, P. (2022). Drilling of recycled carbon fibre-reinforced polymer (rCFRP) composites: analysis of burrs and microstructure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3-4), 1677-1693.
- [6] Geier, N., Poór, D. I., Pereszlai, C., Tamás-Bényei, P., & Xu, J. (2022). A drilling case study in polymer composites reinforced by virgin and recycled carbon fibres (CFRP and rCFRP) to analyse thrust force and torque. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3-4), 2603-2615.
- [7] Lee, J. H., Ge, J. C., & Song, J. H. (2021). Study on burr formation and tool wear in drilling CFRP and its hybrid composites. *Applied Sciences*, 11(1), 384.
- [8] Thakur, R. K., & Singh, K. K. (2021). Influence of fillers on polymeric composite during conventional machining processes: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43, 1-20.
- [9] Li, N., Li, Y., Zhou, J., He, Y., & Hao, X. (2015). Drilling delamination and thermal damage of carbon nanotube/carbon fiber reinforced epoxy composites processed by microwave curing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 97, 11-17.
- [10] Kumar, S., Chauhan, S. R., Rakesh, P. K., Singh, I., & Davim, J. P. (2012). Drilling of glass fiber/vinyl ester composites with fillers. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(3), 314-319.