

Szénszállal erősített polimer kompozit (CFRP) szálvágási szögének hatása a forgácsoló erőre

Geier Norbert*, Mátyási Gyula
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Gyártástudomány és –technológia Tanszék
e-mail: geiernorbert92@gmail.com



Abstract

A szénszállal erősített polimer kompozit (CFRP- Carbon fiber-reinforced polymer) napjaink egyik legkedveltebb és széleskörűen használt műszaki nemfémes anyaga. A mátrix és erősítőszálak miatti anizotrópiából és inhomogenitásból adódóan az anyagjellemzők és így a forgácsolhatósági jellemzők is irányfüggőek. Ebben a cikkben a szálvágási szög hatását vizsgáljuk a forgácsoló erőre egyen- és ellenirányú síkmarás esetében. A kísérleteket a Central Composite (CC) kísérlettervezési módszerrel terveztük meg. A kiértékelés során adekvátvizsgálattal ellenőrzött matematikai modelleket állítottunk fel, melyek a kísérletekhez tartozó reprodukálhatósági szórással becsült konfidencia hibahatárokon belül leírják a vizsgált forgácsolási folyamatokat. A publikáció végén további kísérleti terveket és alkalmazási lehetőségeket foglalmaztunk meg.

Kulcsszavak: CFRP, forgácsolhatóság, marás, szálirány hatás, kísérlettervezés

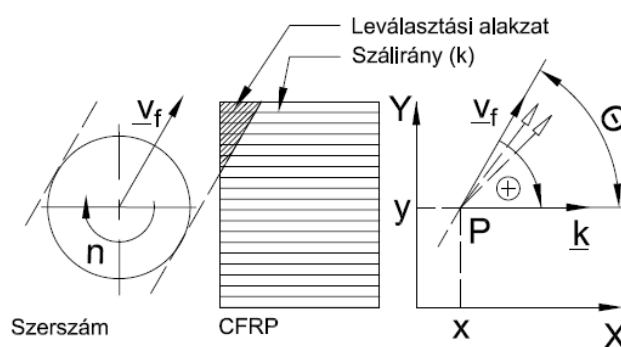
1. Bevezetés

A gépjármű- és repülőgépipar fejlődésének köszönhetően egyre szélesebb körben terjednek el a polimer kompozitok, fokozatosan nő az igény a forgácsolásuk optimalizálására, a forgácsoláskor keletkező jellemző hibák befolyásolására, minimalizálására. Kis sűrűsége és kedvező mechanikai tulajdonságai miatt a szénszállal erősített polimer kompozit (CFRP) az egyik legszélesebb körben használt műszaki nemfémes anyag [1].

A CFRP forgácsolása egy sor egyedi problémát vet fel a mátrix- és az erősítőanyag különböző forgácsolhatósági tulajdonságai miatt [1]. A kitüntetett irányokban szálerősített kompozitok mechanikai anyagjellemzői nem azonosak az anyag minden irányában, így a forgácsolhatósági jellemzők sem homogének [1-5]. A helyfüggő (irányfüggő) forgácsolhatósági jellemzők meghatározása kiemelt figyelmet érdemel. A forgácsoló erő és a megmunkált felületet jellemző mikro és makro geometriai jellemzők azonos technológiai paraméterekkel, de különböző irányokból megmunkálva más értékeket vesznek fel [1-5].

Kutatásunkban a forgácsoló erő változását vizsgáltuk a szálvágási szög (Θ) függvényében egyen- és ellenirányban. A nemzetközi szakirodalomban több

meghatározást publikáltak a szálvágási szög definiálására. Az egyik széleskörűen elfogadott meghatározás a következő [5]: A szerszám előtoló sebesség iránya ($\underline{v}_f$) és az erősítő szálak iránya ($\underline{k}$) között bezárt azon pozitív szöget, amely egyenlő az $\underline{v}_f$ óramutató járásával megegyező irányban történő $\underline{k}$ -ig tartó elforgatásával kirajzolt körívek kisebbik középponti szögével, szálvágási szögnek nevezzük. A szálvágási szög értelmezése az 1. ábrán látható.

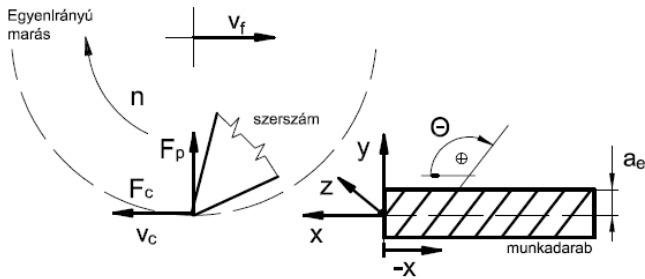


1. ábra: A szálvágási szög (Θ) értelmezése

2. Kísérlettervezés

A szálvágási szögnek a forgácsoló erőre gyakorolt hatását egy 115x60x25 mm nagyságú, kézi laminálással gyártott egy irányban szálerősített CFRP munkadarabon vizsgáltuk homlokmarással (5. ábra). A

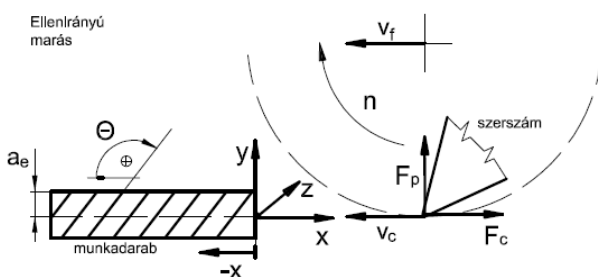
kísérletekhez (CFRP forgácsoláshoz javasolt éles [6]) Ø50 mm-es 5 forgácsoló éllel rendelkező gyorsacél marószerszámot használtunk.



2. ábra: Az egyenirányú CFRP marás elvi vázlata

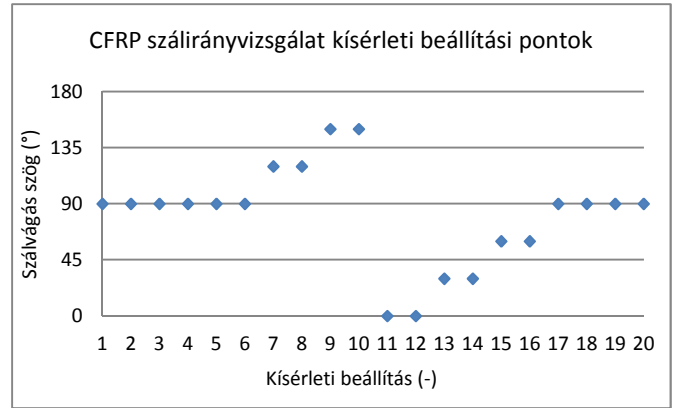
A forgácsolás során ébredő erőkomponenseket (F_c , F_p , F_t) egy KISTLER 9281 B típusú háromkomponenses erőmérő cellával mértük és Labview mérőprogram segítségével gyűjtöttük az adatokat.

A kísérlettervet a Central Composite (CC) [7] kísérlettervezési módszer segítségével hoztuk létre, mely során a szálvágási szög és a marás típusa (egyen- vagy ellenirány, lásd: 2. és 3. ábrák) voltak a folyamatot befolyásoló faktorok. A forgácsoló sebesség ($v_c = 230$ m/min), az előtoló sebesség ($v_f = 397$ mm/min) az axiális ($a_p = 7$ mm) és a radiális fogásmélység ($a_e = 3$ mm) értékeit rögzítettük. Azért választottuk ezeket a fogásmélység értékeket, mert várhatóan nagyobb axiális fogásmélységgel az erősítőszálak hatása nagyobb lesz. Az előtoló- és forgácsoló sebességet a nemzetközi szakirodalomban használt értékek alapján választottuk [1-5].



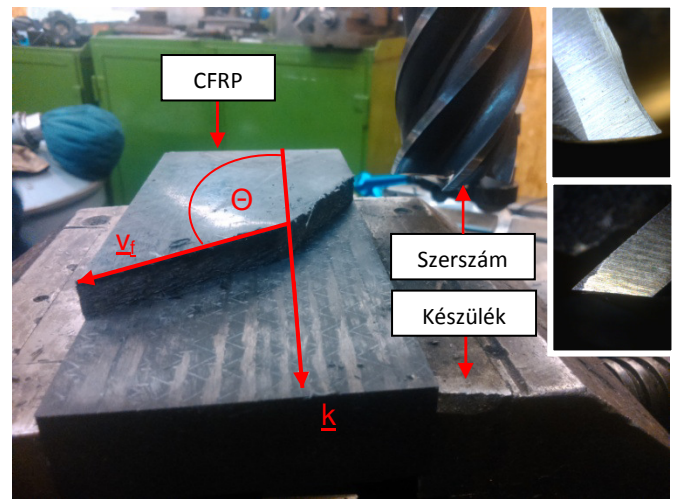
3. ábra: Az ellenirányú CFRP marás elvi vázlata

A kísérleti beállításokhoz tartozó szálvágási szög értékeit a 4. ábra szemlélteti. A páratlan sorszámú kísérletek egyen-, míg a páros sorszámú kísérletek ellenirányúak. A szerszám kopás hatását a mért erők változására a kísérleti faktortér középpontjában ($\Theta = 90^\circ$) végzett több kísérlettel vizsgáltuk a 4. ábrán látható módon. A párhuzamos kísérleti beállítások szükségesek továbbá ahhoz, hogy a kísérletekhez tartozó reprodukálhatósági szórást meghatározhassuk.



4. ábra: A CC kísérletterv CFRP szálirány hatásvizsgálathoz

A kísérleti elrendezést, a munkadarabot és a felhasznált gyorsacél marószerszámot az 5. ábra mutatja.



5. ábra: A CFRP szálirány hatásvizsgálat kísérleti környezete
 Θ - szálvágási szög, $\vec{f}$ - előtolás irány, $\vec{k}$ - szálirány

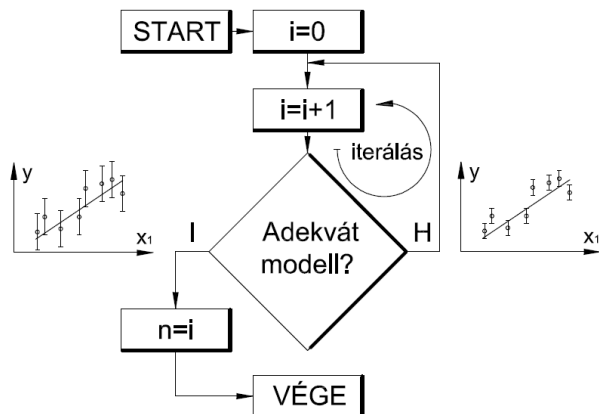
CFRP forgácsolása során keletkező forgács a szerszám gép mozgó alkatrészei közé kerülve erősen koptatja azokat, ezért gondoskodnunk kellett a forgács eltávolításáról. Emiatt a megmunkálás során keletkező porszerű forgácsot egy Nilfisk GB733 típusú ipari vákuumporszívó egységgel távolítottuk el a munkatérből.

3. Kiértékelés

A különböző szálvágási szöggel és marási stratégiával leválasztott, állandó v_f , v_c , a_p , a_e értékek mellett mért forgácsoló erő változását Microsoft Excel 2007 szoftver segítségével értékeltük ki.

Az azonos kísérleti beállításokkal mért erőkomponensek segítségével számolni tudtuk a reprodukálhatósági szórást, ami jellemzi az összes mért

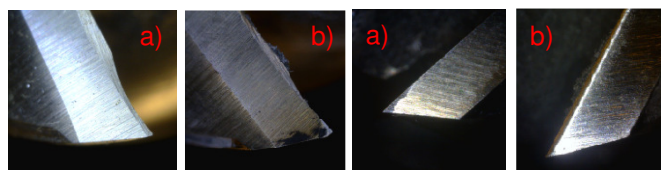
függő változó konfidencia hibahatárát. Ezeket a hibahatárokat a 8. és 9. ábrákon hibasávokkal tüntettük fel. A kísérleti beállításokhoz tartozó mért pontokra n -ed fokú regressziós polinomot illesztettünk, ahol n értékét a 6. ábrán látható algoritmus alapján határoztuk meg.



6. ábra: Regressziós polinom fokszámának (n) meghatározása

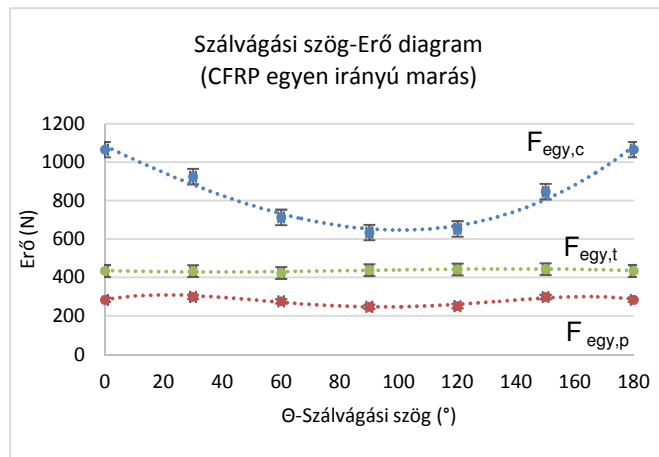
Az adekvátvizsgálat során azt vizsgáltuk, hogy az ismétlési szórás által kijelölt konfidencia sávon belül marad-e a regressziós polinom, hiszen a matematikai regressziós polinom nem közelítheti nagyobb hibával a mért pontokat, mint az egy kísérleti beállításban mért optimalizációs paraméterek reprodukálhatósági szórása.

A szerszám kopásáról minden kísérleti beállítás után egy Dino-Lite AD7013MZT típusú digitális mikroszkóppal felvételeket készítettünk. A felvételek alapján a szerszám hát- és homlokkopása nem jelentős, így nem szükséges a kísérleti eredményeket kompenzálni. (lásd: 7. ábra)



7. ábra: Marószerszám felvételek axiális és radiális irányból
a) Kísérletek előtt, b) Kísérletek után

Az egyenirányban síkmart kísérletek eredményei a 8. ábrán láthatóak. Az előtolás irányú erőkomponens ($F_{egy,c}$) $\Theta = 90^\circ$ -nál minimális, míg a passzív és axiális irányú erők a szálvágási szög hatása csekély.



8. ábra: CFRP szálvágási szög- erő diagram (egyenirány)

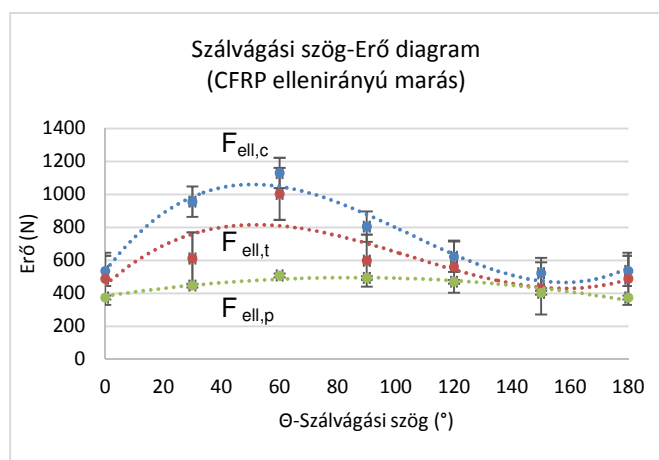
Az adekvát ellenőrzött regressziós polinomok a 8. ábra alapján egyenirányú marás esetében (1):

$$F_{egy}(\theta) = \begin{bmatrix} 0,0001\theta^3 + 0,0148\theta^2 - 7,2752\theta + 1083,9 \\ -2E^{-06}\theta^4 - 0,00911\theta^2 + 2,8\theta + 283,62 \\ -3E^{-05}\theta^3 + 0,0079\theta^2 - 0,4637\theta + 436,71 \end{bmatrix}$$

$$, ahol: F_{egy}(\theta) = \begin{bmatrix} F_{egy,c}(\theta) \\ F_{egy,p}(\theta) \\ F_{egy,t}(\theta) \end{bmatrix} N; \forall \theta \in [0,180]$$

A szálvágási szög fok, míg az erők Newton mértékegységűek.

Az ellenirányban síkmart kísérletek eredményei a 9. ábrán láthatóak. Az előtolás irányú erőkomponens ($F_{ell,c}$) $\Theta = 150^\circ$ -nál minimális, míg a passzív és axiális irányú erők a szálvágási szög hatása nagyobb, mint egyenirányú marásnál, jellegre hasonlóak, mint $F_{ell,c}$.



9. ábra: CFRP szálvágási szög- erő diagram (ellenirány)

Az adekvát ellenőrzött regressziós polinomok a 9. ábra alapján ellenirányú marás esetében (2):

$$F_{ell}(\theta) = \begin{bmatrix} 0,001\theta^3 - 0,3028\theta^2 + 23,226\theta + 534,71 \\ 0,0006\theta^3 - 0,2026\theta^2 + 15,849\theta + 448,83 \\ -0,0155\theta^2 + 2,6352\theta + 382,97 \end{bmatrix}$$

$$, ahol: F_{ell}(\theta) = \begin{bmatrix} F_{ell,c}(\theta) \\ F_{ell,p}(\theta) \\ F_{ell,t}(\theta) \end{bmatrix} N; \forall \theta \in [0,180)$$

A szálvágási szög fok, míg az erők Newton mértékegységűek. A matematikai modellek a vizsgált szerszámra és a vizsgált faktortérben érvényesek a reprodukálhatósági szórással becsült konfidencia hiba intervallumon belül.

1. Összefoglalás és következtetések

A kutatásunkban kis radiális és nagy axiális fogásmélységgel, éles gyorsacél szármaróval végeztünk homlokmarási kísérleteket egyirányú CFRP forgácsolhatóságának vizsgálata okán. A forgácsolási folyamatot befolyásoló két faktor a szálvágási szög és a marási stratégia, míg a vizsgált függő változó a marószerszámra ható erő volt. A kísérleteket a Central Composite kísérlettervezési módszer alapján terveztük meg.

A két vizsgált marási stratégiához tartozó $F(\theta)$ függvények elemzése során megmutattuk, hogy az előtolás irányú erőnek a szálvágási szög függvényében minimuma van mindkét marási stratégia alkalmazásánál, továbbá, hogy ez a minimum hely egyen és ellenirányú marásnál nem azonos.

Az erőminimumon történő forgácsolás polimer mátrixú kompozitoknál kardinális kérdés lehet, hiszen a nagy megmunkálási erők környezetében a súrlódási erők is nagyobbak, ezzel a hő fejlődés is nagyobb, amit a hűtés-kenés nehézkes megvalósíthatósága miatt célszerű a minimumon tartani.

Amennyiben erőminimumra optimalizált marási szerszámpályákat szeretnénk programozni homogén szerkezetű anyagok forgácsolásához, geometriailag csak a fogásmélység nagyságait kell figyelembe vennünk. Szálerősített anyagoknál az anizotrópia miatt az erősítőszálak iránya is befolyásolja az erőminimumra optimalizált marási szerszámpályákat, így CFRP marásakor ezzel számolnunk kell.

További kutatás tárgyát képezik, hogy több faktor (a_e , a_p , v_c , v_f , θ) hatásait is vizsgáljuk mind a forgácsoló erőre, mind más technológiát és alkatrészt minősítő függő változókra (pl.: mikro és makro geometriai jellemzők). Folyamatban vannak továbbá olyan CFRP

fúrési kísérletek, melyekkel a rétegelválás (delamináció) létrejöttének okait és befolyásolhatóságát vizsgáljuk.

Irodalom jegyzék

- [1] D. Kalla, Jamal S.-Ahmad, J. Twomey: Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 882-891.
- [2] G. V. G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar: Three-dimensional macro-mechanical finite element model for machining of unidirectional-fiber reinforced polymer composites. Materials Science and Engineering A 498 (2008) 142-149.
- [3] G. V. G. Rao, P. Majan, N. Bhatnagar: Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – Cutting force analysis. Composites Science and Technology 67 (2007) 579-593.
- [4] A. Mkaddem, I. Demirci, M. E. Mansori: A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of CFRP composites: Cutting forces analysis. Composites Science and Technology 68 (2008) 3123-3127.
- [5] K. A. Calzada, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, J. Samuel, A. K. Srivastava: Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced polymer composites. Journal of Manufacturing Processes 14 (2012) 142-149.
- [6] Vikki Franke: Drilling of long fiber reinforced thermoplastics- Influence of cutting edge on the machining results. CIRP Annals- Manufacturing Technology 60 (2011) 65-68.
- [7] Adler, Markova, Granovszkij: Kísérletek tervezése optimális feltételek meghatározására. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977. (Mir Könyvkiadó, Moszkva)