

A FORGÁCSOLÓERŐ VIZSGÁLATA NYOLCSZÖGLETŰ LAPKÁVAL VÉGZETT HOMLOKMARÁSNÁL

Makkai Tamás

tanársegéd, Miskolci Egyetem, Gyártástudományi Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: tamas.makkai@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A forgácsoló megmunkálások hatékonyságának növelése az ipari vállalatok egy fő célkitűzése. A hatékonyság növelésének egyik módja az, ha a forgácsoló sebességet növeljük. Ebben a cikkben bemutatásra kerül egy nyolcszögletű lapkával elvégzett forgácsolási kísérlet és annak eredményei. Állandó fogásmélység és állandó fogankénti előtolás mellett ötféle fordulatszámot alkalmazva vizsgáltam a forgácsoló sebesség hatását a forgácsolóerőkre ötvözetlen acél homlokmarásakor. A forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő változása azt mutatta, hogy a forgácsoló sebesség növelésével az anyagleválasztási sebesség növelése az energiaigény csökkenésével jár a vizsgált paraméter tartományban.

Kulcsszavak: homlokmarás, forgácsolóerő, fajlagos forgácsolóerő, nyolcszögletű lapka

Abstract

Increasing the efficiency of machining is a major goal of industrial companies. One way to increase efficiency is to increase the cutting speed. This paper presents a cutting experiment with an octagonal insert and its results. Using a constant depth of cut and a constant feed per tooth, I investigated the effect of cutting speed on cutting forces during face milling of non-alloy steel using five spindle speeds. The change in cutting force and specific cutting force showed that increasing the cutting speed increases the material removal rate with a decrease in energy demand in the studied parameter range.

Keywords: face milling, cutting force, specific cutting force, octagonal insert

1. Bevezetés

A forgácsoló megmunkálások közül a homlokmarást előszeretettel alkalmazzák, mert nagy termelékenység, jó felületminőség és pontosság jellemzi. A homlokmarás hatékonyságát, azaz a gépi főidő csökkentését az előtolási sebesség növelésével [1] lehet megvalósítani. Így a technológiai paraméterek közül a fogankénti előtolás és a főorsó fordulatszáma az a két jellemző, amelyekkel a termelékenység befolyásolható. Korábbi kísérleteinkben alumíniumötvözet homlokmarása során vizsgáltuk a termelékenység növelésének lehetőségeit kétféle gyémántszerszámmal, a fogankénti előtolás és a fordulatszám változtatásával [2]. Majd a forgácsolási kísérleteket kiértékeljük az előírt pontossági követelmények szempontjából is. Megállapítottuk, hogy a felületi érdességre, alak- és helyzetpontosságra vonatkozó előírások jóval nagyobbak voltak a mért értékeknél. Ezek szempontjából a termelékenység növelésének nem volt akadálya [3, 4].

A forgácsolás során ébredő erők hatással vannak a munkadarabra, a szerszámmra, azokon keresztül a befogó készülékekre és a szerszámgépre is. A szakirodalomban több cikk is található, mely a forgácsolóerő vizsgálatával foglalkozik homlokmarásnál. Li és társai [5] bemutatták a homlokmarásnál fellépő

forgácsolóerők elméleti modellezésének és szimulációjának új megközelítését. A maró működését számos egyélű forgácsoló szerszám egyidejű munkájaként modellezik és a munkadarab anyagi tulajdonságait az alakváltozás, az alakváltozási sebesség és a hőmérséklet függvényében veszik figyelembe. A modell felhasználásával kifejlesztettek egy forgácsolóerő szimulációs rendszert. Saï és Bouzid [6] egy matematikai modellt mutattak be a felületi érdesség becslésére a felület marásánál. Franco és társai [7] szintén egy geometriai modellt alkalmaztak a homlokmaráshoz, míg Hadad és Ramezani [8] olyan matematikai modelleket készítettek egy Computer Aided Design (CAD) szoftver létrehozására, amely képes felmérni a különféle marási folyamatok paramétereinek hatását a maró felület geometriájára. Felhő és Kundrák kétféle marószerszámmal [9], valamint speciális kialakítású maróval [10] hasonlították össze az elméleti és a valós felületi érdességet. Megállapították, hogy a felület érdessége nyolcszögletű lapka esetén nagyon közel áll az elméleti értékhez, a körlapka alkalmazása esetén viszont más tényezők hatása erősebb.

Korábbi publikációkban bemutattuk C45 acél homlokmarásánál az előtolásnak és a forgácsoló sebességnek a forgácsolóerő összetevőire gyakorolt hatását mind a munkadarab, mind a szerszám koordináta rendszerében értelmezve [11]. Elemeztük a különféle alakú forgács keresztmetszetek és az előtolás hatását a forgácsolóerő komponensekre, valamint a megmunkált felület érdességére [12]. Megvizsgáltuk a forgácsolóerő változását különböző forgácsoló sebességeknél, állandó és változó forgács keresztmetszet esetben is [13]. Összehasonlítottuk a különféle alakú (téglalap, kör és négyzet) lapkákkal végzett homlokmarásnál a forgácsolóerő összetevőinek a változását [14].

A termelékenységet az előtolás, illetve a forgácsoló sebesség növelésével lehet növelni. Ebben a cikkben a forgácsoló sebesség hatását vizsgálom meg, a mért és számított forgácsolóerő komponensek összehasonlítása mellett a fajlagos forgácsolóerő komponensek értékeit is elemzem, majd ebből vonok le következtetéseket a forgácsolás energiaigényére vonatkozóan.

2. Kísérleti feltételek

A kísérleti feltételek az alábbiak voltak:

Szerszámgép: Perfect Jet MCV-M8 (H) függőleges megmunkáló központ

Szerszám: ATORN OCKX 0606-AD-TR HC4640 bevonatos keményfém lapka (1. ábra)

$$\gamma_o=25^\circ; \alpha_o=7^\circ; r_e=0,5 \text{ mm}$$

Marófej: ATORN 10612120 típusú homlokmaró fej, $D=80 \text{ mm}$, $\kappa_r=43^\circ$

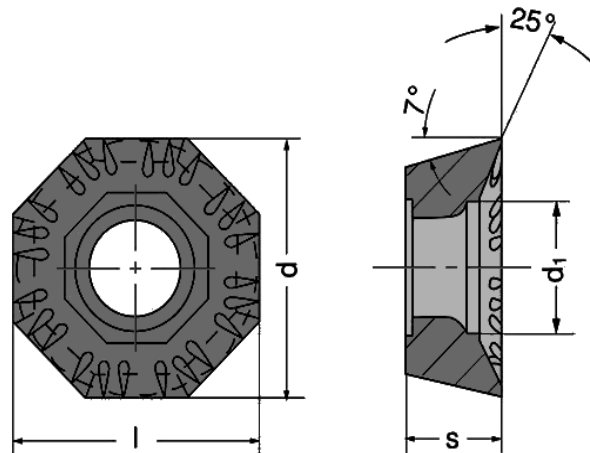
Munkadarab: C45 ötvözetlen szénacél, a forgácsolt felület mérete $58 \times 50 \text{ mm}$

Forgácsolási adatok: forgácsoló sebesség: $v_c=100\text{-}500 \text{ m/min}$
 főorsó fordulatszám: $n_s=454,73\text{-}2273,64 \text{ 1/min}$
 fogásszélesség: $b_w=58 \text{ mm}$
 fogásmélység: $a_p=0,4 \text{ mm}$
 fogankénti előtolás: $f_z=0,8 \text{ mm/fog}$

A környezetterhelés csökkentését szem előtt tartva hűtőfolyadék nem került alkalmazásra.

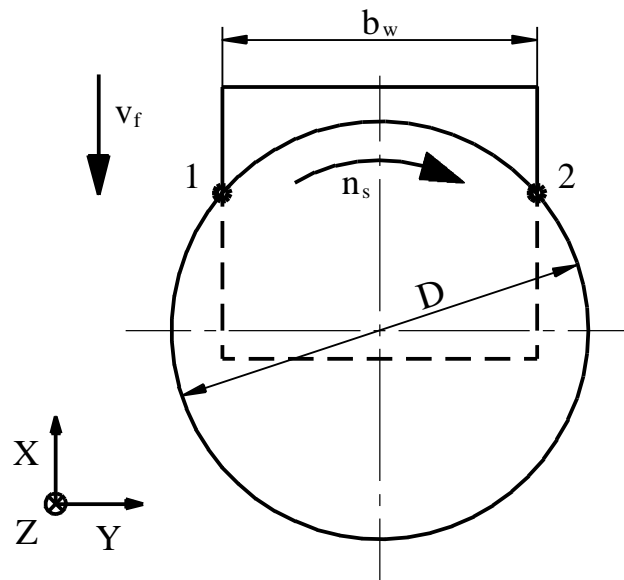
A kísérletek során a munkadarab egy Kistler gyártmányú 9257A típusú három komponensű dinamométerre volt felfogva. A marófejbe csak egy darab marólapka volt szerelve, hogy a forgácsolás során a forgácsolóerő összetevőinek a változását oly módon tudjam rögzíteni, hogy csak egy forgácsolóél hatását vizsgáljam, azaz a többi él kölcsönhatása nélkül. A dinamométerhez volt csatlakoztatva a 3 darab Kistler 5011A töltéserősítő, ezek kimenő jelei egy National Instruments gyártmányú 4 csatornás CompactDAQ-9171 adatgyűjtő egységen keresztül kerültek át a mérőszoftvert futtató laptopra. A speciális

mérőszoftver LabView programnyelven készült. A síkfelület marása során mindhárom irányú erőkomponens (F_x , F_y és F_z) értéke folyamatosan rögzítésre került a célszerűen megválasztott 10 kHz mintavételi frekvenciával.



1. ábra. A kísérleteknél alkalmazott marólapka

A szimmetrikus munkadarab-szerszám elrendezést, a mozgásirányokat és a munkadarabhoz kötött koordináta rendszer irányait a 2. ábra szemlélteti, míg a kísérlet eszközeit a 3. ábrán mutatom be összefoglalva fényképek felhasználásával. Forgácsoláskor a szerszám a munkadarab szimmetria síkjában halad.

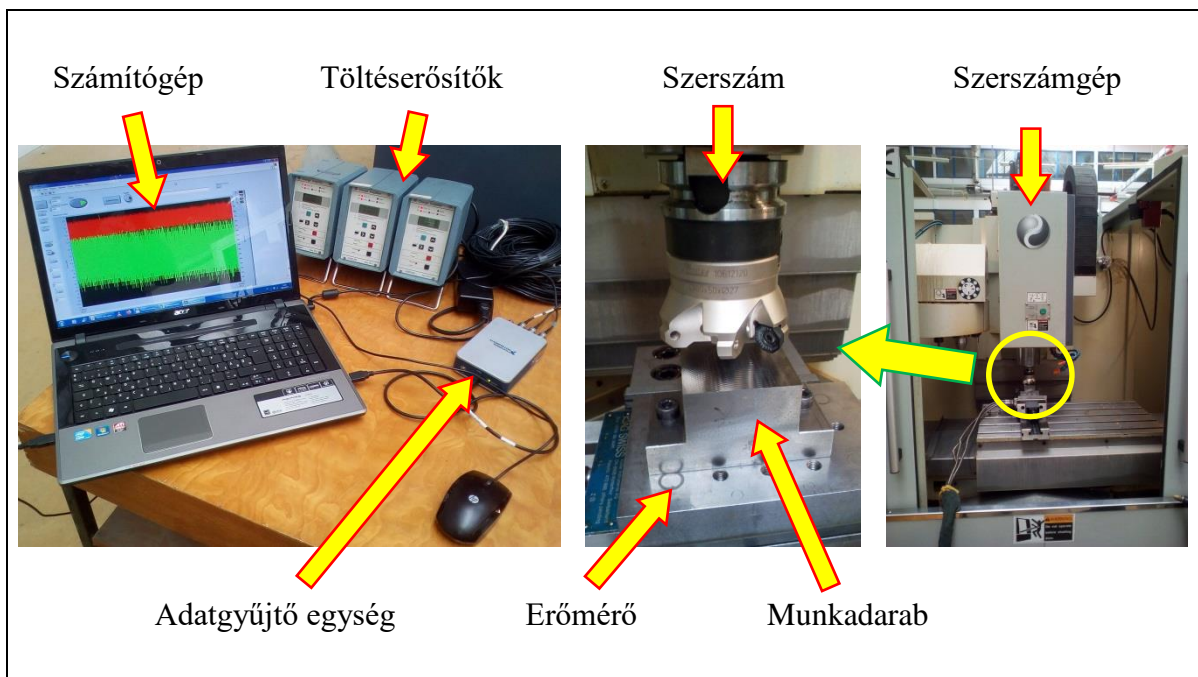


2. ábra. A marási elrendezés és a koordináta irányok [15]

3. Kísérleti eredmények

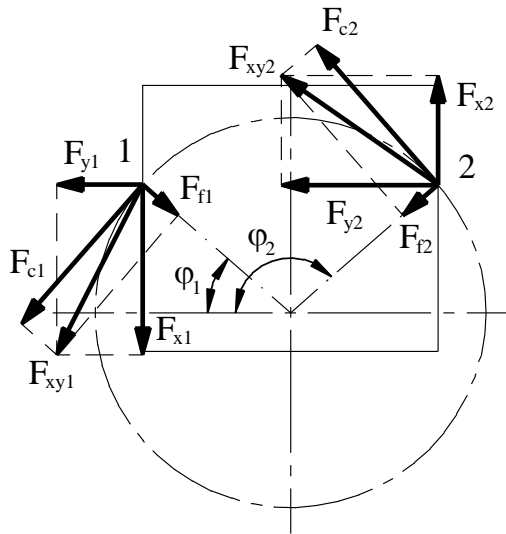
Állandó fogásmélységet és állandó fogankénti előtolást alkalmazva a forgácsoló sebesség értékeit változtattam 100, 200, 300, 400 és 500 m/min-re. A kísérletek során mért F_x , F_y és F_z erőkomponensek (amelyeket a munkadarabhoz kötött álló koordináta rendszerben értelmezzük) értékei alapján kiszámítottam az F_c , F_f és F_p erőkomponensek (szerszámhoz kötött forgó koordináta rendszerben értelmezzük) értékeit. A számításhoz egy korábbi cikkben már közölt összefüggéseket használtam fel [15]. Ezeket, valamint az értelmezésüket segítő vázlatot a 4. ábrán ismertetem. Az 1. táblázatban összefoglaltam a mért és a számított erőkomponensek maximális értékeit az ötféle beállított forgácsoló sebesség szerint. Az F_x , F_y és F_z erőkomponensek maximális értékeit az 5. ábra szemlélteti diagram formájában a forgácsoló sebességekre vonatkozóan.

Az F_x (előtolás irányába eső) erőkomponens esetében a diagramból jól látszik, hogy a forgácsoló sebesség növelésével csökken az értéke. F_y (előtolás irányára merőleges) és F_z (szerszám forgástengelyével egyező irányú) erőkomponensek esetében a változás hasonló tendenciát mutat.



3. ábra. A forgácsoló kísérlet eszközei

A legkisebb, 100 m/min forgácsoló sebességnél a legnagyobb mindkét erő értéke, míg a három középső forgácsoló sebességnél közel azonos értékű ($F_y \approx 600$ N és $F_z \approx 560$ N). A legnagyobb, 500 m/min forgácsoló sebességnél F_y tovább csökken (569 N), míg az F_z csökkenése alig számottevő (545 N). Az erőkomponenseket egymással összehasonlítva a diagramok alapján megállapítottam, hogy az F_x erőkomponens értékei a legkisebbek, míg az F_y és az F_z erőkomponensek értékei közel azonosak az egyes forgácsoló sebességek esetében.



$$\vec{F}_s = -\vec{F}_w \quad (1)$$

$$\vec{F}_w = \vec{F}_x + \vec{F}_y + \vec{F}_z \quad \vec{F}_s = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (2)$$

$$\vec{F}_{xy} = \vec{F}_x + \vec{F}_y \quad F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3)$$

$$F_c = F_{xy} \cdot \sin\left(\pi - \arctg \frac{F_x}{F_y} - \varphi\right) \quad (4)$$

$$F_f = F_{xy} \cdot \cos\left(\pi - \arctg \frac{F_x}{F_y} - \varphi\right) \quad (5)$$

$$F_p = F_z \quad (6)$$

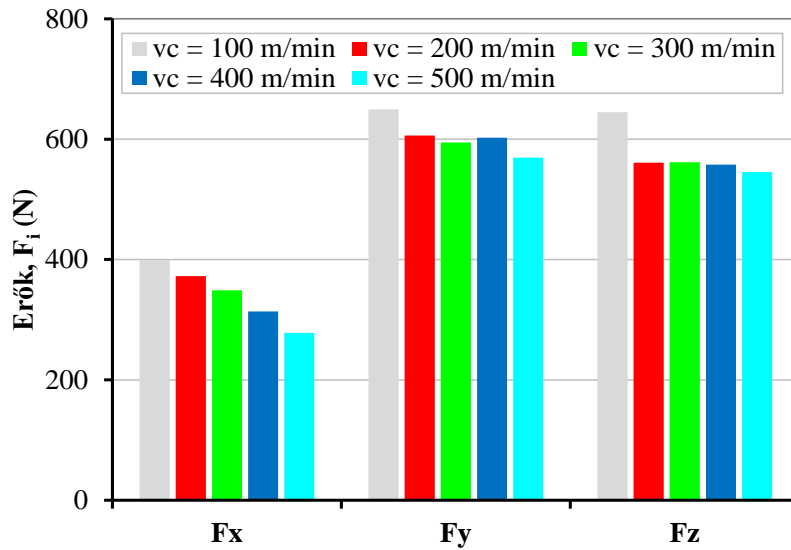
4. ábra. A forgácsolóerő komponensek átszámításának módszere, értelmezése a szerszám fogásba lépésénél (1) és a kilépésnél (2) [15]

1. táblázat. A mért és a számított erőkomponensek maximális értékeinek összefoglalása

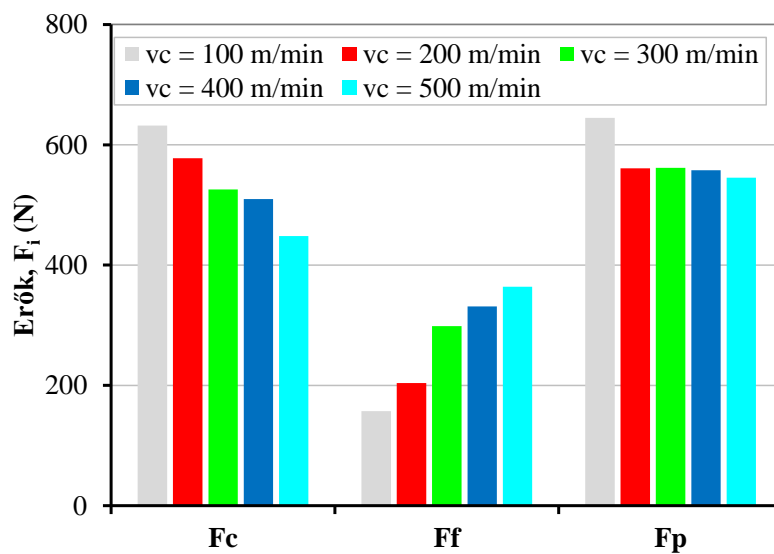
v_c [m/min]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
100	399	650	645	632	157	645
200	372	606	561	578	204	561
300	349	595	562	526	298	562
400	314	602	558	510	331	558
500	278	569	545	448	364	545

A 6. ábra az F_c (érintőirányú), F_f (sugárirányú) és F_p (előbbiekre merőleges, passzív) erőkomponensek maximális értékeit mutatja a forgácsoló sebességek szerint. Az F_c erőkomponens értéke a forgácsoló sebesség növelésével folyamatosan csökken, az F_f erőkomponens értéke pedig folyamatosan nő. F_c és F_f aránya 100 m/min forgácsoló sebességnél 4-szeres, 500 m/min forgácsoló sebességnél 1,23-szoros. Mivel $F_p = F_z$, ezért az F_z -re tett megállapításaim az F_p -re is érvényesek. Nagyságukat tekintve F_c és F_p közel azonosak.

Ahhoz, hogy energetikai szempontból értékelni tudjam a forgácsoló sebesség hatását, a fajlagos forgácsolóerő vizsgálatára van szükség. A kísérletek során állandó fogásmélység és állandó fogankénti előtolás volt beállítva, így a deformálatlan forgács keresztmetszet is állandó volt. Vagyis a forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő változása azonos arányú.



5. ábra. Az F_x , F_y és F_z mért erőkomponensek maximális értékeinek változása a forgácsoló sebesség függvényében



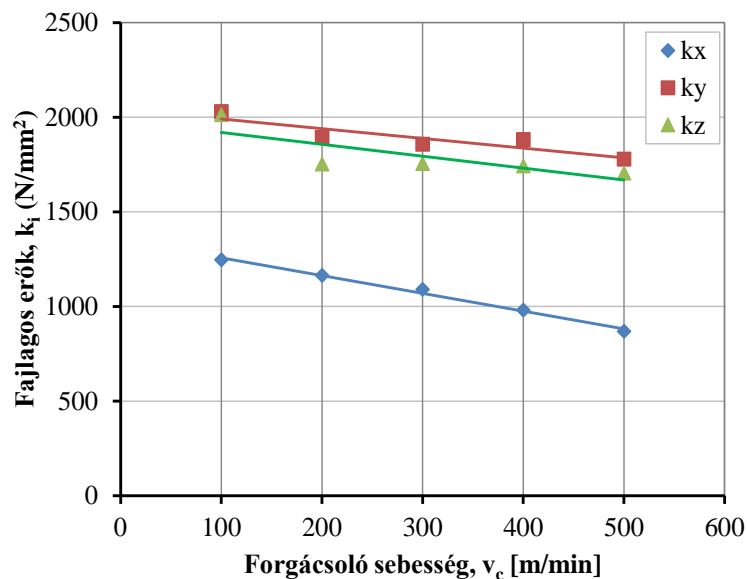
6. ábra. Az F_c , F_f és F_p számított erőkomponensek maximális értékeinek változása a forgácsoló sebesség függvényében

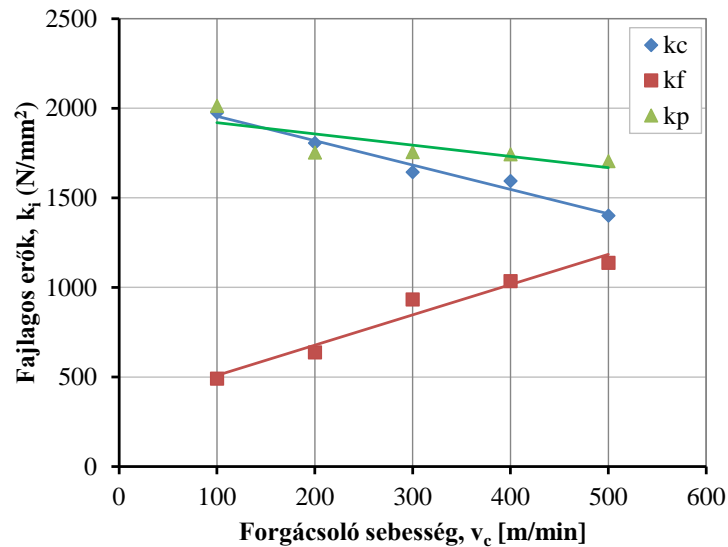
A 2. táblázatban láthatók összefoglalva a munkadarab és a szerszám koordináta rendszerében értelmezhető fajlagos erőkomponensek maximális értékei, mind az öt alkalmazott forgácsoló sebesség esetében. A 7. ábra a k_x , k_y és k_z , a 8. ábra a k_c , k_f és k_p fajlagos erőkomponensek maximális értékeit mutatja a forgácsoló sebességekre vonatkozóan.

2. táblázat. A mért és a számított erőkomponensek maximális fajlagos értékeinek összefoglalása

v_c [m/min]	k_x [N/mm ²]	k_y [N/mm ²]	k_z [N/mm ²]	k_c [N/mm ²]	k_f [N/mm ²]	k_p [N/mm ²]
100	1247	2030	2015	1975	491	2015
200	1164	1894	1753	1806	637	1753
300	1090	1858	1755	1643	932	1755
400	980	1882	1743	1594	1035	1743
500	869	1779	1704	1401	1137	1704

Az egyenes arányosság miatt a fajlagos forgácsolóerő komponensek változása a forgácsolóerő komponensek változását követi. A 7. ábrán a mért erő értékekből számított fajlagos erő értékeket lineáris trenddel közelítettem. Jól látható, hogy mindhárom fajlagos erőösszetevő változása csökkenő trendet mutat a forgácsoló sebesség növelése esetén a vizsgált tartományban. A három fajlagos forgácsolóerő összetevő közül a k_y és a k_z értékei közel azonosak, a k_x értékei az előzőknek közelítőleg 50-66%-a. A 8. ábrán láthatók a számított k_c , k_f és k_p fajlagos forgácsolóerő komponens értékek, valamint a hozzájuk tartozó lineáris trendegyenesek. Megfigyelhető a fajlagos főforgácsolóerő (k_c) 29%-os csökkenése a forgácsoló sebesség 100 m/min-ről 500 m/min-re növelése mellett.

**7. ábra.** A k_x , k_y és k_z fajlagos erőkomponensek maximális értékeinek változása a forgácsoló sebesség függvényében



8. ábra. A k_c , k_f és k_p fajlagos erőkomponensek maximális értékeinek változása a forgácsoló sebesség függvényében

4. Összefoglalás

Ebben a cikkben egy nyolcszög alakú (oktagonális) lapkával végzett homlokmarási kísérlet eredményeiről számolok be. Szimmetrikus homlokmarást alkalmazva ötféle forgácsoló sebesség estén forgácsolási erőmérést végeztem állandó fogásmélység és állandó fogankénti előtolás mellett. A fajlagos forgácsolóerő változásán keresztül vizsgáltam a forgácsleválasztás energiaigényét. A kísérleti eredmények alapján megállapítottam, hogy a vizsgált tartományban az F_c értéke folyamatosan csökken a forgácsoló sebesség növelésével. A forgácsoló sebességet 100 m/min-ről 500 m/min-re növelve F_c 29%-kal csökken. Hasonló mértékben csökken a fajlagos főforgácsolóerő (k_c) értéke is. Megállapítottam, hogy a vizsgált tartományban a forgácsoló sebesség növelésével csökken az egységnyi forgácstérfogat leválasztásának az energiaigénye. A forgácsoló sebesség növelésével nő a termelékenység is.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] Karpuschewski, B., Kundrák, J., Emmer, T., Borysenko, D.: *A new strategy in face milling - inverse cutting technology*, Solid State Phenomena, Volume 261 (2017), pp. 331-338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.331>
- [2] Kundrák, J., Molnár, V., Deszpoth, I., Makkai, T.: *Productivity considerations in face milling*, Materials Science Forum, Volume 952 (2019), pp. 66-73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.952.66>

- [3] Kundrák, J., Molnár, V., Makkai, T., Dági, T.: *Analysis of material removal efficiency in face milling of aluminum alloy*, In: Gapiński, B., Szostak, M., Ivanov, V. (eds) *Advances in Manufacturing II. MANUFACTURING 2019, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham (2019), pp. 393-404. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_34
- [4] Kundrák, J., Molnár, V., Makkai, T.: *Anyagleválasztási hatékonyság vizsgálata alumíniumötvözet homlokmarásánál*, *Gépgyártás*, Volume 58, Issues 1-2 (2019), pp. 87-93.
- [5] Li, X. P., Zheng, H. Q., Wong, Y. S., Nee, A. Y. C.: *An approach to theoretical modeling and simulation of face milling forces*, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 2, Issue 4 (2000) pp. 225-240. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(00\)70024-7](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(00)70024-7)
- [6] Saï, K., Bouzid, W.: *Roughness modeling in up-face milling*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 26 (2005), pp. 324-329. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2305-2>
- [7] Franco, P., Estrems, M., Faura, F.: *A study of back cutting surface finish from tool errors and machine tool deviations during face milling*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48 (2008), pp. 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.07.001>
- [8] Hadad, M., Ramezani, M.: *Modeling and analysis of a novel approach in machining and structuring of flat surfaces using face milling process*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 105 (2016), pp. 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.03.005>
- [9] Felhő, C., Kundrák, J.: *Comparison of theoretical and real surface roughness in face milling with octagonal and circular inserts*, *Key Engineering Materials*, Volume 581 (2014), pp. 360-365. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.360>
- [10] Kundrák, J., Felhő, C.: *3D Roughness Parameters of Surfaces Face Milled by Special Tools*, *Manufacturing Technology*, Volume 16 Issue 3(2016), pp. 532-538. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/3/532>
- [11] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Deszpoth, I., Nagy, A.: *Analysis of the effect of feed on chip size ratio and cutting forces in face milling for various cutting speeds*, *Manufacturing Technology*, Volume 18 Issue 3 (2018), pp. 431-438. <https://doi.org/10.21062/ujep/117.2018/a/1213-2489/MT/18/3/431>
- [12] Kundrák, J., Gyáni, K., Felhő, C., Deszpoth, I.: *The effect of the shape of chip cross section on cutting force and roughness when increasing feed in face milling*, *Manufacturing Technology*, Volume 17 Issue 3 (2017), pp. 335-342. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/3/335>
- [13] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E., Makkai, T.: *The examination of cutting force as function of depth of cut in cases with constant and changing chip cross section*, In: Gapiński, B., Szostak, M., Ivanov, V. (eds) *Advances in Manufacturing II. MANUFACTURING 2019, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham (2019), pp. 405-415. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_35
- [14] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Karkalos, N. E.: *Effect of edge geometry on cutting forces in face milling with different feed rates*, *Manufacturing Technology*, Volume 19, Issue 6 (2019), pp. 984-992., <https://doi.org/10.21062/ujep/407.2019/a/1213-2489/MT/19/6/984>
- [15] Kundrák, J., Makkai, T., Deszpoth, I., Nagy, A.: *Investigation of cutting force in face milling*, *Rezanie i Instrumenty v Tehnologicheskikh Sistema*, Volume 87 (2017), pp. 118-125.