

A HOMLOKMARÁS HATÉKONYSÁGÁNAK ELEMZÉSE, A FORGÁCSOLÓERŐ VIZSGÁLATA

Makkai Tamás

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

Absztrakt

A cikk célja az EFOP 3.6.1. projekt támogatásával megvalósított kutatómunka bemutatása, eredményeinek összefoglalása. Az elvégzett feladatokról részletesen beszámoltam/beszámoltunk hazai és külföldi szakfolyóiratokban. A forgácsolási adatok megadásánál törekedni kell arra, hogy minél nagyobb anyagleválasztási sebességet lehessen megvalósítani, ugyanakkor a beállított értékekkel teljesülniük kell a legyártott alkatrészekre vonatkozó pontossági és minőségi követelményeknek. A technológiai paraméterek változása hatással van a forgácsolás során fellépő terhelésre, ezért kiemelkedően fontos a forgácsolóerő (és összetevőinek) a vizsgálata, az összefüggések feltárása.

Kulcsszavak: homlokmarás, hatékonyság növelése, anyagleválasztási sebesség, forgácsolóerő, fajtákos forgácsolóerő, lapka geometria összehasonlítása, EFOP

Abstract

The aim of this article is to present the research work carried out with the support of the project EFOP 3.6.1 and to summarize its results. I/we reported the completed tasks in detail in domestic and foreign journals. When determining the cutting data, strive to achieve the highest possible material removal rate, while at the same time the set values have to meet the accuracy and quality requirements for the manufactured parts. Changes in technological parameters influence the load during cutting, therefore it is extremely important to examine the cutting force (and its components) and to explore the relationships.

Keywords: face milling, increase efficiency, material removal rate (MRR), cutting force, specific cutting force, insert shapes comparison, EFOP

1. A homlokmarás hatékonyságának elemzése

A tömeggyártással jellemezhető autóiparban a termelékenység fokozása elsődleges cél a gyártó vállalatok számára. A megmunkálás feltételeinek kiválasztására és a forgácsolási adatok helyes megadására kiemelt figyelmet fordítanak, mert annak hatása a sorozat nagyságával arányosan nő. Ezt figyelembe véve vizsgáltuk a járműgyártásban használt alumíniumötvözet forgácsolását (síkmárás). Alumínium ötvözetek forgácsolásának egyik leghatékonyabb módja a gyémántszerszámmal végzett megmunkálás.

A homlokmarás hatékonyság elemzésének legelterjedtebb módja az anyagleválasztási sebesség (Q_w [mm^3/s]) és/vagy a felületképzési sebesség (A_w [mm^2/s]) meghatározása:

$$Q_w = a_p \cdot a_e \cdot v_f \text{ (mm}^3/\text{s) ,} \quad (1)$$

$$A_w = a_e \cdot v_f \text{ (mm}^2/\text{s) ,} \quad (2)$$

ahol a_p : fogásmélység [mm]; a_e : fogásszélesség [mm]; v_f : előtolási sebesség [mm/min].

A vizsgált munkadarabokon a ráhagyás állandó, amelyet egy fogásban választunk le. Ezért a két paraméter közül elegendő az anyagleválasztási sebességet elemeznünk.

Az anyagleválasztási sebességet alapvetően a v_f előtolási sebesség határozza meg, ami homlokmarás esetében:

$$v_f = f_z \cdot z_s \cdot n_s \text{ (mm/min) ,} \quad (3)$$

ahol f_z : egy élre jutó előtolás [mm/él]; z_s : a szerszám éleinek száma [-]; n_s : a szerszám fordulatszáma [1/min].

A kísérletek során a v_f előtolási sebességet meghatározó három paramétert variáltuk és a gyakorlati anyagleválasztási sebesség értékeinek alakulását elemeztük. Két különböző átmérőjű marófejet alkalmaztunk, és hasonlítottuk össze az átmérő hatását az anyagleválasztási sebességre. A homlokmarás alapidejét (t_a) megmértük, majd a gépi főidejét (t_g) kiszámítottuk. Megállapítottuk, hogy lehetőség van az egy fogásban leválasztott ráhagyás mellett a korábban alkalmazott értékek növelésére. A legkisebb mértékben a főorsó fordulatszám (n_s) növelésével nő a megmunkálás termelékenysége, a fogankénti előtolás (f_z) növelésével viszonylag kis mértékben nő, illetve a marófej forgácsolóélei számának (z_s) növelésével jelentős mértékben nő a termelékenység az eredeti technológiai beállításhoz viszonyítva.

Igazoltuk, hogy az MKGS rendszer teljesítménykorlátain belül jelentős gyártási időmegtakarítás és ezáltal költségmegtakarítás érhető el úgy, hogy az alkatrész geometriai pontossága és felületminősége a rajzi előírás szerinti marad. A vizsgált tartományban a 63 mm átmérőjű marófejjel maximum 20,4%, a 80 mm átmérőjű marófejjel 28,1% gépi főidő csökkenés érhető el. A gépi főidő csökkenésével az ezen idő alapján számított gyakorlati anyagleválasztási sebességben a két különböző marófejjel 25,6%, illetve 39,0% növekedést értünk el. A mart felület érdességét mérésrel ellenőriztük. Ezen túl, mint a gyártás szempontjából lényeges paramétereket, a síklapúságot és párhuzamosságot is ellenőriztük. Minden megmunkált darabon mérést végeztünk. A síklapúsági hiba értéke minden beállítással közel egyenlő és egy nagyságrenddel kisebb a megengedett határértéknél. A tapasztalt legnagyobb Rz érték is csak a megengedett érték fele lett. A párhuzamossági hiba legnagyobb értékei sem haladták meg a megengedett érték felét. Az új beállításokkal a darabidő csökkent, a termelékenység növekedett, a költséghatékonyság szintén növekedett. [1-3]





2. A homlokmarásnál fellépő forgácsolóerő vizsgálata

A homlokmarás dinamikai jellemzőinek kutatása már régóta kiemelt szerepet tölt be. A forgácsolási paraméterek és a szerszám élgeometria megválasztása befolyásolja az MKGS-rendszerben fellépő terhelések nagyságát és irányát is. A szakirodalomban számos cikk foglalkozik a forgácsolóerő vizsgálatával. Ezek közül kiemelendő Karpuschewski és szerzőtársai [4] munkája, cikkükben a síkfelületek marásánál egy új technológiát mutattak be, az inverz forgácsolási technológiát. Leírták az inverz forgácsolás elméleti alapjait. Hagyományos és inverz homlokmarás esetén szimulációt alkalmazva összehasonlították a forgácsolóerőket, marási kísérletekkel validálták azt. Kunderák és társai [5] a különféle alakú forgács keresztmetszetek és az előtolás hatását elemezték a forgácsolóerő összetevőire és a forgácsolt felület érdességére.

Jelen cikkben összefoglalt homlokmarási kísérletek egy Perfect Jet MCV-M8 (H) függőleges tengelyű megmunkáló központon zajlottak. A munkadarab C45 ötvözetlen szénacélból készült, a forgácsolt felület 58 x 50 mm volt. Négyféle különböző alakú keményfém lapkával (1. táblázat) zajlottak a kísérletek. A marófejbe csak egy darab lapka volt szerelve, hogy a forgácsolóerő összetevőinek a változását a többi él kölcsönhatása nélkül tudjuk rögzíteni, egyetlen forgácsolóél hatását tudjuk vizsgálni. Az erőmérő rendszer egy Kistler gyártmányú 9257A típusú, három komponensű dinamométerből, 3

darab Kistler 5011A töltéserősítőből, egy National Instruments gyártmányú, 4 csatornás CompatDAQ-9171 adatgyűjtő egységből és egy laptopból állt, melyen egy LabView programnyelven készült mérőszoftver futott. A megmunkálás közben mindhárom irányú erőkomponens (F_x , F_y és F_z) értéke folyamatosan rögzítésre került.

1. táblázat. Az alkalmazott lapkák jellemzőinek összefoglalása [15]

Lapka alak		Lapka kód	Geometriai jellemzők
Jel	Megnevezés		
	kör	RCKT1204M0-PM	$\gamma_o=0^\circ$; $\alpha_o=7^\circ$
	négyzet	SEKN 1203 AFTN JC5030	$\kappa_r=45^\circ$; $\gamma_o=0^\circ$; $\alpha_o=20^\circ$; $0,85 \times 45^\circ$
	nyolcszög	OCKX 0606-AD-TR HC4640	$\kappa_r=43^\circ$; $\gamma_o=25^\circ$; $\alpha_o=7^\circ$; $r_e=0,5$ mm
	téglalap	R215.44-15T308M-WL	$\kappa_r=90^\circ$; $\gamma_o=0^\circ$; $\alpha_o=11^\circ$; $r_e=0,8$ mm

2.1. Téglalap alakú lapkával végzett kísérletek

Az alkalmazott négyféle lapka közül a legtöbbször a téglalap alakú lapkatípust használtuk fel a kísérletek során. Az egyik kísérletnél állandó előtolás mellett vizsgáltuk a fogásmélység és a forgácsoló sebesség hatását a forgácsolóerő összetevőire. A fogásmélység 0,4 mm-ről 0,8 mm-re növelésével a forgácsolóerő mindhárom összetevője növekedett. F_z esetében a növekedés nem számottevő, míg F_x és F_y egyformán, megközelítőleg a duplájára nőtt. A növekedés mértéke nagyobb volt a nagyobb forgácsoló sebességek esetén. A k_x és k_y fajlagos forgácsolóerők értékei csökkentek a forgácsoló sebesség növekedésével. Ilyen tendencia a k_z értékeinél nem figyelhető meg. A k_x és k_y értékei nagyjából megegyeznek a két fogásmélységnél, míg a k_z értékei jelentősen, mégpedig 34-41%-kal csökkennek. A lapkára ható F_c forgácsolóerő a fogásmélység változásával arányosan változik, viszont a forgácsoló sebesség változása gyakorlatilag nem befolyásolja annak értékét. [6]

Állandó forgács keresztmetszet (A_c) mellett (kétféle fogásmélység és kétféle előtolás alkalmazásával) vizsgáltuk a forgácsoló sebesség hatását a forgácsolóerőre. A kísérletek során megerősítést nyert, hogy az állandó forgács keresztmetszet mellett, az előtolás növelésével, vagyis az a_p/f_z arány csökkenésével csökken a forgácsolóerő és a felvett teljesítmény is. A fogásmélység növekedése, azaz az a_p/f_z arány növekedése (állandó A_c mellett) esetén a forgácsolóerő növekedése figyelhető meg. Az a_p növekedése növeli az F_x komponens értékét, míg az F_y értéke kissé növekszik. Az F_z értéke azonban kissé csökken. Ez a jelleg minden forgácsoló sebességnél hasonló a vizsgált tartományban. A változás aránya azt mutatta, hogy a fogásmélység változása nem korlátozza a forgácsolási adatok választását. [7]

Egy következő kísérletben állandó és változó forgács keresztmetszet esetén (kétféle fogásmélység és kétféle előtolás alkalmazásával) vizsgáltuk a forgácsoló sebesség hatását a forgácsolóerőre. Állandó A_c -vel rendelkező esetekben a fogásmélység növekedése nagyobb forgácsolóerőket eredményezett, különösen F_x és F_y esetében. A forgácsoló sebesség változása a forgácsolóerők csökkenését eredményezte, amint az várható volt, különösen az F_x összetevő esetében. Hasonló tendenciák figyelhetők meg a fajlagos forgácsolóerők esetében is. Különböző A_c értékek esetén a forgácsolóerő komponenseinek egyértelmű növekedését figyeltük meg, amikor az A_c megnövekedett. Az A_c kétszeres növekedé-

se a fogásmélység megduplázásával állandó előtolási sebességnél az F_x és F_y erőkomponensek majdnem kétszeres növekedését eredményezte. Az A_c kétszeres növekedése esetén az előtolási sebesség megduplázásával állandó fogásmélység mellett az erők növekedését is észleltük, de kisebb mértékben. Ezenkívül megfigyeltük, hogy a fajlagos forgácsolóerők az A_c növekedésével minden esetben csökkentek. A forgácsolóerők grafikonjainak elemzése megerősítette a forgácsolóerő összetevőinek fent említett megállapításait mind a munkadarabhoz, mind a szerszámhoz rögzített koordináta rendszerben. [8]

Majd állandó fogásmélység esetén megvizsgáltam a fogankénti előtolás, a forgácsoló sebesség és a forgács méretarányának hatását a forgácsolóerőre. A forgácsoló sebesség és a fogankénti előtolás változását elemezve elmondható, hogy a vizsgált tartományban a fogankénti előtolás növelésével a felületképzési sebesség arányosan 16-szorosára nőtt; ugyanez a tendencia érvényes a 8-szorosára növekvő forgácsolóerőre is. A fajlagos forgácsolóerők esetében ez a tendencia fordított. Az a pont, ahol a görbék meredekségében változás következik be, ott van, ahol $a_p=f_z$, ez egybeesik az 1-es forgács méretarányal. Az 1-nél nagyobb forgács méretarány esetén k_p értéke nagyobb, mint k_c értéke, az $a_p/f_z < 1$ értékeknél az ellenkezője látható. Az előtolás hatása a forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő komponenseire sokkal jelentősebb, mint a forgácsoló sebességé. [9]

Ezt követően állandó fogásmélység és állandó forgácsoló sebesség mellett, ötféle fogankénti előtolást alkalmazva vizsgáltam a forgácsolóerőt szimmetrikus, egyenirányú és ellenirányú homlokmarás esetén. Ellenirányú marásnál F_y értéke folyamatosan, szinte lineárisan növekszik, majd a vágásból kilépve nullára csökken. Egyenirányú marásnál F_y gyors, maximális értékre emelkedését folyamatos, lassú csökkenés követi. Az előtolás növelésével az egyes erőösszetevők értéke növekedett. Bár az y irányú dinamikus hatás jelentősebb az egyenirányú marásnál, a kísérletek nem mutatták ki, hogy az F_y erő komponens maximális értékei jelentősen különböznenek a három marási módban. [10]

2.2. Négyzet és kör alakú lapkával végzett kísérletek

A négyzet, illetve kör alakú lapkával állandó fogásmélység mellett végeztük el a kísérleteket. Egyik sorozatnál a fogankénti előtolás volt állandó, a másikon pedig a forgácsoló sebesség. A négyzet alakú lapkánál megfigyeltük, hogy a legtöbb esetben az F_y értékek nagyobbak, és a forgácsoló sebesség növekedése leginkább az F_z -t, míg az előtolási sebesség növekedése leginkább az F_y -t érinti. A változó forgácsoló sebesség esetén a fajlagos forgácsolóerők változása összhangban volt a forgácsoló erő összetevőinél megfigyelt trendekkel. Változó előtolási sebesség esetén a fajlagos forgácsolóerők tendenciái fordítottak a forgácsolóerőknél megfigyelt tendenciákhoz képest a változó forgács keresztmetszet miatt [11]. A kör alakú lapkával elvégzett kísérleteknél hasonló megállapításokat tudtunk tenni [12].

2.3. Nyolcszög alakú lapkával végzett kísérletek

A nyolcszög alakú lapkával szintén állandó fogásmélység mellett végeztem el a kísérleteket. Egyik sorozatnál a fogankénti előtolás volt állandó, a másikon pedig a forgácsoló sebesség. Az első sorozatnál 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. Nagyságukat tekintve F_c és F_p közel azonosak. 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 fajlagos főforgácsolóerő (k_c) 29%-os csökkenését tapasztaltam a forgácsoló sebesség 100 m/min-ről 500 m/min-re növelése mellett [14]. A második sorozatnál a növekedés mértéke az $F_z(=F_p)$ és az F_f esetén kisebb (214%, illetve 240%), míg az F_y és

az F_c esetén a növekvő tendencia közel párhuzamos görbét mutat, a növekedésük mértéke pedig 426% és 493%. Az alapsíkban megjelenő terhelésről elmondható, hogy az y -irányú összetevője (F_y) nagyobb az x -irányú (F_x) összetevőjénél a teljes vizsgálati tartományban [15].

2.4. A forgácsolóerő összehasonlítása különböző lapka alakok esetén

A különféle lapka típusokkal, azonos feltételek mellett elvégzett kísérletek lehetőséget adtak arra, hogy összehasonlító elemzés keretében az alkalmazott lapkákkal végzett homlokmarások energia felhasználását is értékelni tudjuk. Az első elemzésbe a téglalap, a négyzet és a kör lapkákkal végzett kísérletek kerültek [13]. A nyolcszög lapkával elvégzett kísérletek kiértékelése után mind a négy, általam eddig felhasznált lapka esetében megtörtént az összehasonlító elemzés [15]. A különböző alakú lapkáknál az élgeometria eltérése miatt a fellépő erőknél (erő összetevőknél) is különbség mutatkozott. A fajlagos erőösszetevők vizsgálatával megállapítottam, hogy szimmetrikus homlokmarásnál az alkalmazott paraméter tartományban az egységnyi forgácstérfogat leválasztásához a legkisebb energia a négyzet alakú lapkánál szükséges. A további javasolt sorrend: téglalap, nyolcszög, majd kör alakú lapka.

4. Összefoglalás

Az EFOP 3.6.1. projekt támogatásával megvalósított kutatómunkám során a homlokmarást vizsgáltam. Tanulmányoztam a hatékonyság növelésének lehetőségeit, alumínium munkadarabokon gyakorlati forgácsolási kísérleteket végeztem. Vizsgáltam a rajzi előírásoknak (érdesség, párhuzamosság, síklapúság) való megfelelést is. Több forgácsolási erőmérési kísérletet elvégeztem ötvöztelen acél homlokmarásánál. Megvizsgáltam, hogy a forgácsolási paraméterek milyen hatással vannak a forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő összetevőire, azok változására. Elemeztem a különféle lapka alakok esetében a forgácsolás energia felhasználását. Kutatómunkám eredményeit számos hazai és külföldi folyóiratban is megjelentettem önállóan vagy társszerzőként.

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] 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>
- [2] Kundrák, J., Molnár, V., Makkai, T., Dági, T.: *Analysis of material removal efficiency in face milling of aluminum alloy*, Advances in Manufacturing II, Volume 4 - Mechanical Engineering (2019) pp. 393-404. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_34
- [3] Kundrák, J., Molnár, V., Makkai, T.: *Anyagleválasztási hatékonyság vizsgálata alumíniumöt-vözet homlokmarásánál*, Gépgyártás, Volume 58, Issues 1-2, (2019) pp. 87-93.
- [4] 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>

- [5] 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>
- [6] Karkalos, N. E., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Kundrák, J.: *Investigation of the effect of depth of cut and cutting speed on cutting forces during face milling of steel with a rectangular cutting insert*, Cutting & Tools in Technological System, Volume 90, (2019) pp. 3-8. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.90.01>
- [7] Karkalos, N. E., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Kundrák, J.: *Influence of depth of cut and cutting speed on cutting forces in face milling under constant chip cross-section conditions*, Cutting & Tools in Technological System, Volume 90, (2019) pp. 9-14. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.90.02>
- [8] 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*, Advances in Manufacturing II, Volume 4 - Mechanical Engineering (2019) pp. 405-415. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_35
- [9] Makkai, T.: *A homlokmarásnál fellépő forgácsolóerő vizsgálata az előtolás és forgácsoló sebesség változtatásával*, Doktoranduszok Fóruma 2018 Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa Miskolc (2019) pp. 47-55.
- [10] Makkai, T.: *Effect of cutting parameters in face milling*, 2019 MultiScience - XXXIII. micro-CAD International Multidisciplinary Scientific Conference, pp. 1-8. Paper: D1-3 <https://doi.org/10.26649/musci.2019.046>
- [11] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E., Makkai, T.: *The effect of cutting speed and feed on cutting forces in face milling with square shaped insert*, Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019 (2020), pp. 192-200. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_17
- [12] Makkai, T., Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Karkalos, N. E.: *Face milling with a round insert at various cutting speeds and feed rates*, Cutting & Tools in Technological System, Volume 91, (2019) pp. 125-133. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.91.12>
- [13] 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>
- [14] Makkai, T.: *A forgácsolóerő vizsgálata nyolcszögletű lapkával végzett homlokmarásnál*, Multidiszciplináris Tudományok, Volume 10, Issue 3, (2020) pp. 285-293. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.34>
- [15] Makkai, T.: *Oktagonális lapka alkalmazása során mért forgácsolóerő vizsgálata és összehasonlítása más lapka geometriákkal homlokmarás esetén*, Multidiszciplináris Tudományok, Volume 10, Issue 4, (2020) pp. 292-301. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.4.33>