

OKTAGONÁLIS LAPKA ALKALMAZÁSA SORÁN MÉRT FORGÁCSOLÓERŐ VIZSGÁLATA ÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA MÁS LAPKA GEOMETRIÁKKAL HOMLOKMARÁS ESETÉN

Makkai Tamás

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

Absztrakt

A termelékenység növelése versenyelőnyt jelent a termelő vállalatoknál, ezért annak kutatása az egyik meghatározó irányvonalat képviseli a forgácsoló megmunkálások területén. A hatékonyságot a technológiai paraméterek módosításával lehet befolyásolni. Homlokmarás esetén az egyik módszere a termelékenység növelésének az, ha az egy élre jutó előtolást növeljük. Ebben a cikkben bemutatásra kerül egy nyolcszögletű lapkával végzett forgácsolási kísérlet, valamint annak eredményei. Állandó fogásmélység és állandó forgácsoló sebesség mellett ötféle fogankénti előtolás alkalmazásával vizsgáltam az előtolás hatását a forgácsolóerőkre ötvözetlen acél homlokmarásánál. A kísérlet eredményeit felhasználva, valamint az előző kísérletek eredményeivel összevetve elemeztem a fajlagos forgácsolóerő változását négy különböző lapkageometria (lapkaalak) esetén. Ebből megállapítottam, hogy energiafelhasználás szempontjából legelőnyösebb a vizsgált lapkák közül a téglalap, majd a négyzet, a nyolcszög és a kör alakú lapka alkalmazása a vizsgált paramétertartományban.

Kulcsszavak: homlokmarás, forgácsolóerő, fajlagos forgácsolóerő, nyolcszögletű lapka, lapkageometria összehasonlítása

Abstract

Increasing productivity is a competitive advantage for manufacturing companies, so its research represents one of the defining directions in the field of machining. Efficiency can be affected by modifying technological parameters. One way to increase productivity is to increase the feed per tooth in face milling. This paper presents a cutting experiment with an octagonal insert and its results. At a constant depth of cut and a constant cutting speed, I investigated the effect of the feed on the cutting forces in face milling of non-alloy steel using five feeds per tooth. Using the results of the experiment and comparing them with the results of previous experiments, I analysed the changes in specific cutting force for four different insert geometries (insert shapes). From this, I concluded that the most advantageous from the point of view of energy consumption is the use of rectangular, then square, octagonal and circular inserts in the examined parameter range.

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

1. Bevezetés

Síkfelületek előállítására a homlokmarást előszeretettel alkalmazzák, jó felületminőség és pontosság mellett a termelékenysége is kiváló. A homlokmarás termelékenységének növelését az előtolási sebesség növelésével [1] lehet megvalósítani, azaz a fogankénti előtolás és a forgácsolósebesség növelése teszi azt lehetővé. A megmunkálás során ébredő terhelések hatással vannak a munkadarabra és a szer-

számra, illetve a teljes MKGS rendszerre. A nemzetközi és a hazai szakirodalomban számos cikk foglalkozik homlokmarás esetén a forgácsolóerő vizsgálatával. Li és társai [2] a homlokmarásnál fellépő forgácsolóerők elméleti modellezését és szimulációját mutatták be új megközelítésben. A modellezés során a szerszám működését több egyélű forgácsolószerszám egyidejű munkájaként vették figyelembe.

A lapkageometriai jellemzői, mint például a csúcssugár, a főélelhelyezési szög és a homlokszög is szintén jelentős szerepet játszhatnak a folyamat kimenetelében, mivel befolyásolják a forgácsolóél terhelési körülményeit, valamint a felületi érdességet is, így a megfelelő geometriájú lapka kiválasztása döntő jelentőségű. Felhó és Kundrák kétféle marószerszámmal [3] és speciális kialakítású maróval [4] hasonlították össze az elméleti és a valós felületi érdességet. Megállapították, hogy nyolcszögletű lapka esetén a felületi érdesség jól közelít az elméleti értékhez, a körlapka alkalmazása során pedig egyéb tényezők hatása erősebb. Maráshoz a leggyakrabban téglalap, négyzet és kör alakú lapkák használatosak [5]. A kör alakú lapkák bizonyos sajátosságokat mutatnak a különleges formájuk miatt, a főélelhelyezési szög értéke változó, az erő- és hőeloszlás egyenletesebb, a forgács vastagsága a forgácsolóél mentén változik [6, 7].

Homlokmarási kísérletek során Korkut és Donertas [8] a forgács keresztmetszetétől és a forgácsolási sebességtől függően kiértékelték a forgácsolóerőket és a felületi érdességeket kétféle acél munkadarabnál. Azt tapasztalták, hogy bizonyos forgácsolási paraméter tartományon belül a növekvő forgácsolósebesség növelte a forgácsolóerőket, míg alacsonyabb és közepes sebességnél a marószerszám élrátét kialakulási hajlama megnőtt.

Gurdal és társai [9] összehasonlították a különféle marólapkák (négyzetes, kör és egy nagy előtolású) teljesítményét nagyoló marás során. Hangsúlyozták a főélelhelyezési szög fontosságát, amely befolyásolja a forgács alakját és vastagságát, valamint a forgácsolóerő eloszlását a szerszámon. Megállapították, hogy a nagyoló marás során a kisebb főélelhelyezési szöggel rendelkező lapkák javíthatják a termelékenységet és csökkenthetik a rezgéseket, a négyzetes lapkák pedig nagyobb szerszámkopást mutattak.

A szerszámgeometria hatással van a megmunkált felület minőségére. Suresh Kumar Reddy és Venkateswara Rao [10] kísérleti vizsgálatokkal meghatározták a szerszámgeometria (radiális homlokszög és csúcssugár) és a forgácsolási körülmények (forgácsolósebesség és előtolási sebesség) hatását a megmunkálási teljesítményre szénacél marása során. A felületi érdesség előrejelzési modelljének optimalizálására genetikai algoritmusokat alkalmaztak, így egy olyan módszert alkottak, amely megadja a megmunkálási paramétereket a lehető legjobb felületminőség eléréséhez.

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]. Megvizsgáltuk a különféle alakú forgács keresztmetszetek és az előtolás hatását a forgácsolóerő komponensekre, valamint a megmunkált felület érdességére [12]. Összehasonlítottuk a különféle alakú (téglalap, kör és négyzet) lapkákkal végzett homlokmarásnál a forgácsolóerő összetevőinek a változását [13]. Vizsgáltam a forgácsolósebesség hatását a forgácsolóerőre és fajlagos forgácsolóerőre nyolcszögletű lapka alkalmazása esetén [14].

A termelékenységet az előtolás növelésével is lehet növelni, ebben a cikkben a fogankénti előtolás hatását vizsgálom meg a forgácsolóerő és a fajlagos forgácsolóerő összetevőire. Ennek eredményeit és a korábbi kísérletek [13] eredményeit felhasználva a négyféle lapkageometria (alak) esetében összehasonlító elemzést is közlök, a fogankénti előtolás és a fellépő terhelés (forgácsolóerő és fajlagos forgácsolóerő összetevői) függvényében.

2. Kísérleti feltételek

A kísérletek egy Perfect Jet MCV-M8 (H) függőleges tengelyű megmunkáló központon zajlottak. Az alkalmazott szerszám egy ATORN OCKX 0606-AD-TR HC4640 típusú bevonatos keményfém lapka volt ($\gamma_o = 25^\circ$; $\alpha_o = 7^\circ$; $r_\varepsilon = 0,5$ mm), mely egy ATORN 10612120 típusú homlokmaró fejbe volt szerelve ($D = 80$ mm, $\kappa_r = 43^\circ$). A marófejbe csak egy darab marólapka került (1. ábra), hogy a forgácsolóerő összetevőinek a változását a többi él kölcsönhatása nélkül tudjam rögzíteni, vagyis egyetlen forgácsolóél hatását tudjam vizsgálni. A munkadarab C45 ötvözetlen szénacélból készült, a forgácsolt felület 58×50 mm volt. A forgácsolási adatokat az 1. táblázat tartalmazza. A környezet terhelésének csökkentése érdekében szárazmegmunkálás történt, hűtőfolyadékot nem alkalmaztunk a kísérlet során.

1. táblázat. Forgácsolási adatok

| Megnevezés | Jelölés | Érték |
|---------------------|---------|----------------|
| forgácsolósebesség | v_c | 200 m/min |
| főorsó fordulatszám | n_s | 909,46 1/min |
| fogásszélesség | b_w | 58 mm |
| fogásmélység | a_p | 0,8 mm |
| fogankénti előtolás | f_z | 0,1–0,8 mm/fog |



1. ábra. A kísérleteknél alkalmazott szerszám és munkadarab

A kísérleteknél alkalmazott erőmérő rendszer:

- egy Kistler gyártmányú 9257A típusú három komponensű dinamométer,
- 3 darab Kistler 5011A töltéserősítő,
- egy National Instruments gyártmányú 4 csatornás CompactDAQ-9171 adatgyűjtő egység,
- laptop, LabView programnyelven készült mérőszoftverrel.

A megmunkálás közben mindhárom irányú, munkadarab koordináta rendszerében értelmezett erőkomponens (F_x , F_y és F_z) értéke folyamatosan rögzítésre került, a mintavételi frekvencia 10 kHz-re volt megadva. Szimmetrikus homlokmarás volt beállítva, azaz a szerszám forgástengelye a munkadarab szimmetria síkjában haladt.

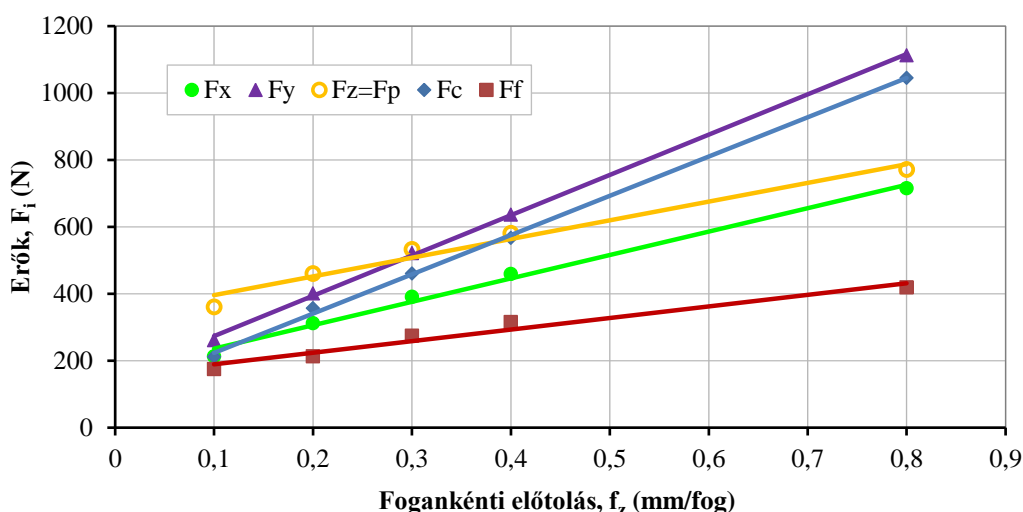
3. Kísérleti eredmények

A kísérleteket állandó fogásmélység és állandó forgácsolósebesség beállításával végeztem, a fogankénti előtolás értékeit pedig változtattam, ezek 0,1–0,2–0,3–0,4–0,8 mm/fog értékre voltak beállítva. A kísérletek során az előzőekben már bemutatott erőmérő rendszerrel mértem az F_x , F_y és F_z erőkomponenseket (munkadarabhoz kötött álló koordináta rendszerben), majd ezek alapján kiszámítottam az F_c , F_f és F_p erőkomponenseket (szerszámhoz kötött forgó koordináta rendszerben). A mért és a számított erőkomponensek maximális értékei a 2. táblázatban láthatók összefoglalva mind az ötféle fogankénti előtolásra vonatkozóan, ezeket a 2. ábra diagram formájában is szemlélteti.

2. táblázat

A mért és a számított erőkomponensek maximális értékeinek összefoglalása

| Fogankénti előtolás | Erőkomponensek | | | | | |
|---------------------|----------------|---------|--------|-----------|--------|--------|
| | Mért | | | Számított | | |
| f_z | F_x | F_y | F_z | F_c | F_f | F_p |
| [mm/fog] | [N] | [N] | [N] | [N] | [N] | [N] |
| 0,1 | 213,14 | 261,49 | 361,26 | 212,02 | 174,99 | 361,26 |
| 0,2 | 312,54 | 401,26 | 460,53 | 357,26 | 213,58 | 460,53 |
| 0,3 | 391,12 | 521,57 | 532,81 | 461,08 | 275,05 | 532,81 |
| 0,4 | 459,13 | 636,50 | 581,17 | 567,40 | 315,30 | 581,17 |
| 0,8 | 715,60 | 1112,67 | 771,94 | 1045,55 | 419,35 | 771,94 |



2. ábra. A mért és a számított erőkomponensek maximális értékeinek változása a fogankénti előtolás függvényében

Mindegyik erőkomponens esetében megfigyelhető, hogy azok közel lineárisan növekednek a fogankénti előtolás növelésével. A növekedés mértéke a vizsgált fogankénti előtolás tartományban 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 görbéket 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. A fogankénti előtolás növelésével a különbség még markánsabban jelenik meg. A szerszámot érő terhelés tangenciális összetevője, azaz a főforgácsolóerő (F_c) növekedése is nagyobb mértékű, mint a radiális összetevő (F_f) növekedése. A szerszám főorsóját terhelő F_p erőkomponens esetében a változás kedvező, hiszen a fogankénti előtolás nyolcszorosára való növelése mellett az F_p csak a duplájára nőtt.

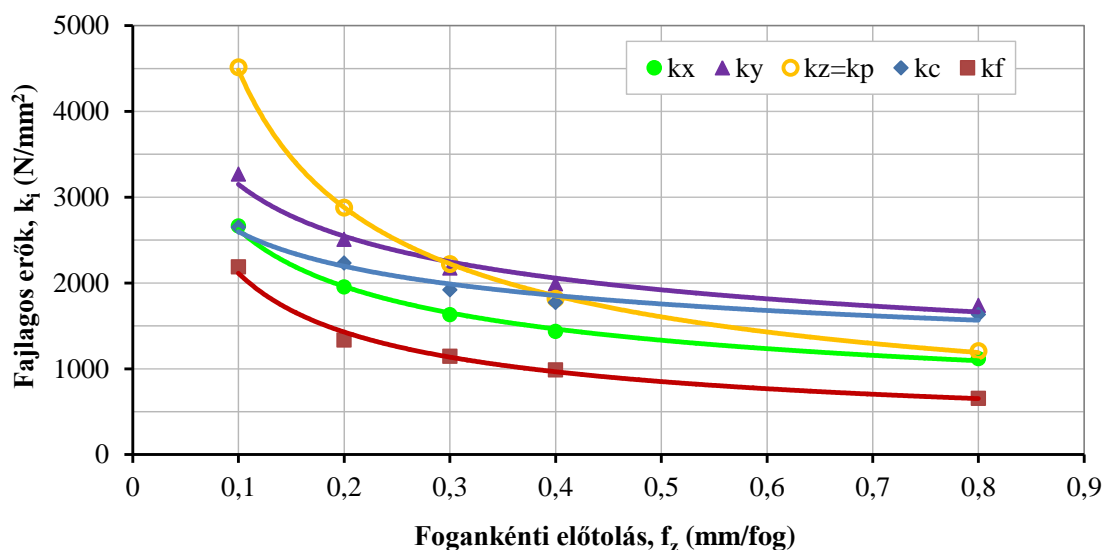
Energetikai szempontból a fajlagos forgácsolóerő meghatározásával lehet értékelni a fogankénti előtolás hatását. Mivel a kísérletek során a fogankénti előtolás változó paraméter volt, így a deformálatlan forgácskeresztmetszet is változott. A számítással meghatározott fajlagos erőkomponensek maximális értékei a 3. táblázatban láthatók összefoglalva az öt alkalmazott fogankénti előtolás esetében. A 3. ábra pedig a fajlagos erőkomponensek maximális értékeinek változását mutatja a fogankénti előtolásokra vonatkozóan.

3. táblázat

A mért és a számított erőkomponensek maximális fajlagos értékeinek összefoglalása

| Fogankénti előtolás | Fajlagos erőkomponensek | | | | | |
|---------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Mért erőkből | | | Számított erőkből | | |
| f_z | k_x | k_y | k_z | k_c | k_f | k_p |
| [mm/fog] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 0,1 | 2664,22 | 3268,61 | 4515,69 | 2650,28 | 2187,43 | 4515,69 |
| 0,2 | 1953,35 | 2507,90 | 2878,29 | 2232,90 | 1334,86 | 2878,29 |
| 0,3 | 1629,65 | 2173,19 | 2220,03 | 1921,18 | 1146,05 | 2220,03 |
| 0,4 | 1434,80 | 1989,07 | 1816,14 | 1773,13 | 985,31 | 1816,14 |
| 0,8 | 1118,13 | 1738,55 | 1206,15 | 1633,66 | 655,23 | 1206,15 |

A fogankénti előtolással arányosan növekvő deformálatlan forgácskeresztmetszet leválasztása nagyobb forgácsolóerőt igényel. Viszont az egységnyi forgácskeresztmetszet leválasztásához szükséges erő – mint ahogy a 3. táblázatban és a 3. ábrán megjelenik – csökkenő jelleget mutat. Legnagyobb mértékű a csökkenés a vizsgált fogankénti előtolás tartományban a $k_z(=k_p)$ esetén, ahol ~4500 N/mm²-ről ~1200 N/mm²-re csökkent, ami közelítőleg 73%-os csökkenést jelent. A munkadarab koordináta-rendszerében meghatározott x és y irányú összetevők csökkenése k_x esetében 58%, k_y esetében pedig 47%. A szerszám koordináta rendszerében meghatározott k_c komponens ~2650 N/mm²-ről ~1630 N/mm²-re csökkent (-38%), a k_f komponens pedig ~2200 N/mm²-ről ~650 N/mm²-re csökkent (-70%). Az elvégzett kísérletek és az adatok kiértékelése alapján megállapítom, hogy az alkalmazott paraméterek esetén a fogankénti előtolás 0,1 mm/fog-ról 0,8 mm/fog-ra való növelése esetén a fajlagos forgácsolóerő mindegyik összetevője csökken, így az egységnyi forgácstérfogat leválasztásához szükséges energiafelhasználás is csökken.







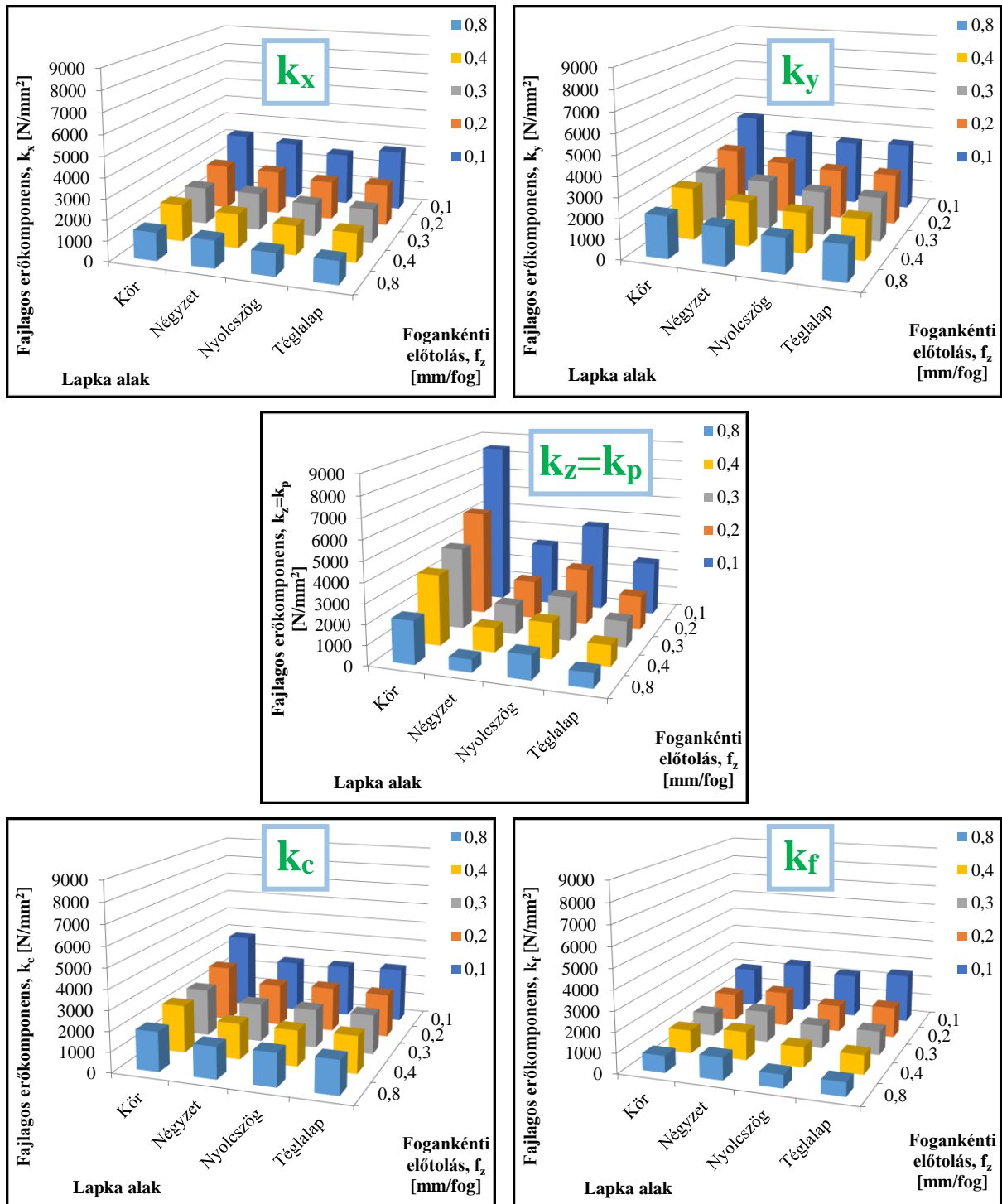
3. ábra. A fajlagos erőkomponensek maximális értékeinek változása a fogankénti előtolás függvényében

4. A lapkageometria hatásának elemzése

Az előzőekben bemutatott nyolcszögletű lapkával végzett kísérletek eredményeit kiegészítve egy korábbi cikkünk [13] eredményeivel összehasonlító elemzést végeztem, ahol az ipari gyakorlatban általánosan alkalmazott négy különféle geometriával (alakokkal) rendelkező lapkával elvégzett kísérleteknél az energiafelhasználást vizsgáltam. A cél annak meghatározása volt, hogy melyik lapkageometriával végezhető el a legkisebb energia felhasználásával a homlokmarás során az egységnyi forgácsolóerő leválasztása, illetve milyen sorrendet lehet megadni a lapkageometriák szerint az energiaigényre vonatkozóan.

4. táblázat. A vizsgált lapkák jellemzőinek összefoglalása

| Lapkaalak | | Lapka típusa Marófej típusa | Szerszám geometriai jellemzői |
|---|------------|--|--|
| Jel | Megnevezés | | |
|  | kör | RCKT1204M0-PM Sandvik R200-068Q27-12L | $\gamma_o = 0^\circ$; $\alpha_o = 7^\circ$ |
|  | négyzet | SEKN 1203 AFTN JC5030 Canela 0748.90.063 | $\kappa_r = 45^\circ$; $\gamma_o = 0^\circ$; $\alpha_o = 20^\circ$; $0,85 \times 45^\circ$ |
|  | nyolcszög | OCKX 0606-AD-TR HC4640 ATORN 10612120 | $\kappa_r = 43^\circ$; $\gamma_o = 25^\circ$; $\alpha_o = 7^\circ$; $r_e = 0,5$ mm |
|  | téglalap | R215.44-15T308M-WL Sandvik R252.44-080027-15M | $\kappa_r = 90^\circ$; $\gamma_o = 0^\circ$; $\alpha_o = 11^\circ$; $r_e = 0,8$ mm |



4. ábra. A fajlagos erőkomponensek maximális értékeinek változása a fogankénti előtolás függvényében a négyféle lapkatípus esetében

A különböző alakkal rendelkező lapkák eltérő élgeometriával rendelkeznek, különböző a főélelhelyezési szögük (κ_r), a hátszögük (α_0) és a csúcssugaruk (r_ϵ), amelyek a szerszám forgácsolóélére és a munkadarabra ható eltérő terheléshez vezetnek. A kísérletek azonos feltételek mellett zajlottak az összehasonlíthatóság végett: a C45 alapanyagú acél munkadarabok homlokmarása 0,8 mm fogásmélységgel és 200 m/min forgácsolósebességgel történt ugyanazon ötféle fogankénti előtolással (0,1–0,8 mm/fog). Az összes kísérlet száraz megmunkálási körülmények között, szimmetrikus munkadarabszerszám elrendezés mellett lett végrehajtva. A kísérletek során alkalmazott és vizsgált négyféle lapka típusa és főbb geometriai jellemzői a 4. táblázatban láthatók összefoglalva.

A 4. ábrán jól látható, hogy mindegyik lapkatípus esetében a fogankénti előtolás növelésével mindegyik fajlagos erőkomponens értéke egyértelműen csökkent. A részletes elemzést az alábbiakban fajlagos erőkomponensenként közlöm:

- A k_x komponens esetében a legkisebb értékek a nyolcszög alakú lapkánál adódtak, a két legnagyobb fogankénti előtolás esetében pedig a téglalap alakú lapkánál és a nyolcszög alakú lapkánál azonos értékeket tapasztaltam. Egyéb esetekben a k_x komponensek aránya a téglalap alakú lapkánál a nyolcszög alakú lapkához viszonyítva 102–106%. Viszonyítási alapként felhasználva a nyolcszög alakú lapkánál található értékeket az arány a négyzet alakú lapkánál 113–120%, míg a kör alakú lapkánál 113–127%.
- A k_y komponens esetében a k_x komponensnél leírtakhoz hasonló jelleget tapasztaltam, itt is a legkisebb értékek a nyolcszög alakú lapkánál adódtak. Viszonyítási alapként felhasználva a nyolcszög alakú lapkánál található értékeket az arány a téglalap alakú lapkánál 101–104%, a négyzet alakú lapkánál 105–111%, a kör alakú lapkánál pedig 118–129%.
- A $k_z(=k_p)$ komponens esetében a legkisebb értékek a téglalap alakú lapkánál adódtak, kivétel a legnagyobb fogankénti előtolásnál volt, ahol a négyzet alakú lapka alkalmazásával 15%-kal kisebb érték jelent meg. Viszonyítási alapként felhasználva a téglalap alakú lapkánál található értékeket az arány a négyzet alakú lapkánál 113–119% (a kivételtől eltekintve), a nyolcszög alakú lapkánál 164–172%, a kör alakú lapkánál pedig 294–338%. Ennél a komponensnél figyelhető meg a legnagyobb szóródás az értékeknél.
- A k_c komponens esetében a legkisebb értékek a négyzet alakú lapkánál adódtak, a 0,4 mm/fog fogankénti előtolás esetében pedig a négyzet alakú lapkánál és a nyolcszög alakú lapkánál azonos értékeket tapasztaltam. Egyéb esetekben a k_c komponensek aránya a nyolcszög alakú lapkánál a négyzet alakú lapkához viszonyítva 101–106%. Viszonyítási alapként felhasználva a négyzet alakú lapkánál található értékeket az arány a téglalap alakú lapkánál közel azonos (103–106%), míg a kör alakú lapkánál 123–146%.
- A k_f komponens esetében nem lehet egyértelműen megadni a legkisebb értékekkel rendelkező lapkaalakot. Viszonyítási alapnak a nyolcszög alakú lapkánál található értékeket választottam, így az arány a téglalap alakú lapkánál 97–115%, a kör alakú lapkánál 92–127%, a négyzet alakú lapkánál pedig 114–168%.

Mind a munkadarabra ható erő komponenseiből meghatározott fajlagos erőkomponens értékek (k_x , k_y , k_z), mind a szerszám (lapka) élére ható erő komponenseiből meghatározott fajlagos erőkomponens értékek (k_c , k_f , k_p) alapján az energiafelhasználás szempontjából a vizsgált négyféle lapkageometria (alak) felhasználását az alábbi sorrendben javaslom: négyzet, téglalap, nyolcszög, kör.

5. Összefoglalás

A cikk első részében egy homlokmarási kísérlet eredményeit mutatom be. A szimmetrikus homlokmarás nyolcszög alakú (oktagonális) lapkával volt elvégezve, állandó fogásmélység és állandó forgácsoló-

lósebesség mellett ötféle fogankénti előtolás esetén forgácsolási erőmérést végeztem. Megvizsgáltam az anyagleválasztás energiaigényét a fajlagos forgácsolóerő változásán keresztül. A fogankénti előtolás növelésével mindegyik erőkomponens értéke növekedett. A kísérletek eredményei alapján azt a megállapítást tettem, hogy az alkalmazott paraméterek esetén a fogankénti előtolás 0,1 mm/fog-ról 0,8 mm/fog-ra való növelésével a fajlagos forgácsolóerő mindegyik összetevője csökkent, tehát az egységnyi forgácsstérfogat leválasztásához szükséges energiafelhasználás is csökkent.

Ezt követően a négyféle alakú lapkával elvégzett kísérleteknél az energiaigényt vizsgáltam. Az azonos feltételek mellett elvégzett kísérletek lehetővé tették a lapkageometria hatásának összehasonlító elemzését. A különböző alakú lapkáknál az élgeometria eltérése miatt a fellépő erőknél (erő összetevőknél) is különbség mutatkozott. A fajlagos erő összetevőinek vizsgálatával megállapítottam, hogy szimmetrikus homlokmarásnál az alkalmazott paramétertartományban az egységnyi forgácsstérfogat leválasztásához a legkisebb energia a négyzet alakú lapkánál szükséges. A további javasolt sorrend: téglalap, nyolcszög, majd kör alakú lapka.

6. Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka 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. (2017). A new strategy in face milling – inverse cutting technology. *Solid State Phenomena*, Volume 261, pp. 331–338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.331>
- [2] Li, X. P., Zheng, H. Q., Wong, Y. S., Nee, A. Y. C. (2000). An approach to theoretical modeling and simulation of face milling forces. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 2, Issue 4, pp. 225–240. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(00\)70024-7](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(00)70024-7)
- [3] Felhő, C., Kundrák, J. (2014). Comparison of theoretical and real surface roughness in face milling with octagonal and circular inserts. *Key Engineering Materials*, Volume 581, pp. 360–365. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.360>
- [4] Kundrák, J., Felhő, C. (2016). 3D roughness parameters of surfaces face milled by special tools. *Manufacturing Technology*, Volume 16, Issue 3, pp. 532–538. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/3/532>
- [5] Zarkti, H., El Mesbahi, A., Rechia, A., Jaider, O. (2015). *Towards an automatic-optimized tool selection for milling process, based on data from Sandvik Coromant*, Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées, Tanger, Morocco.
- [6] Antonialli, A. I. S., Diniz, A. E., Pederiva, R. (2010). Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 50, Issue 1, pp. 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.006>
- [7] Ghorbani, H., Moetakef-Imani, B.: Specific cutting force and cutting condition interaction modeling for round insert face milling operation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 84, Issues 5–8, pp. 1705–1715. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7985-2>

- [8] Korkut, I., Donertas, M. A. (2007). The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling. *Materials & Design*, Volume 28, Issue 1, pp. 308–312. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.002>
- [9] Gurdal, O., Wright, A., Carpenter, C., Blackmore, M.: Investigation of the performance of different face milling inserts to improve rough milling of SA508 Grade 3 forgings. In: *Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference PVP 2018*, Prague, Czech Republic, <https://doi.org/10.1115/PVP2018-84337>
- [10] Suresh Kumar Reddy, N., Venkateswara Rao, P. (2005). Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 26, pp. 1202–1210. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2110-y>
- [11] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Deszpoth, I., Nagy, A. (2018). 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, 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. (2017). 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, pp. 335–342. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/3/335>
- [13] Kundrák, J., Markopoulos, A. P., Makkai, T., Karkalos, N. E. (2019). Effect of edge geometry on cutting forces in face milling with different feed rates. *Manufacturing Technology*, Volume 19, Issue 6, pp. 984–992. <https://doi.org/10.21062/ujep/407.2019/a/1213-2489/MT/19/6/984>
- [14] Makkai, T. (2020). A forgácsolóerő vizsgálata nyolcszögletű lapkával végzett homlokmarásnál. *Multidiszciplináris Tudományok*, Volume 7, Issue 3, pp. 285–293. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.34>